

**DISEÑO Y FABRICACIÓN
DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN**



PEREZ, Enzo Nicolás

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2025

**DISEÑO Y FABRICACIÓN
DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN**

PEREZ, Enzo Nicolás

Director: Dr. Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-Directora: Ing. **GARRIDO, Rocio**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2025

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN

PEREZ, Enzo Nicolás

Aprobado en fecha xx de xxx de 2025

Tribunal evaluador:

- Dra. ASENSIO, Daniela
- Ing. RAMOSKA, Leandro Ariel
- Ing. MAZZONI, José Luis

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres, Claudia y Roque, y a mi hermana Camila, por todo el esfuerzo realizado y el apoyo constante que me brindaron durante mi formación profesional. Por su amor incondicional y por estar siempre presentes.

A Daniel, por acercarme a este proyecto y por enseñarme a perseverar siempre.

A mi novia Florencia y a mis amigos, quienes me regalaron los mejores recuerdos de esta etapa y siempre me acompañaron con su apoyo incondicional.

Al Dr. Ing. Damián Campos y a la Ing. Rocío Garrido, por haber confiado en mí, por su formación y acompañamiento durante estos años, y por su compromiso y dedicación con la educación.

Finalmente, a la Universidad Pública y a todos los docentes que generosamente compartieron su tiempo y conocimiento para mi formación como Ingeniero Mecánico.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN

Autor: PEREZ, Enzo Nicolás.

Director: Dr. Ing. CAMPOS, Damián.

Co-Directora: Ing. GARRIDO, Rocio.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo y fabricación de una máquina peletizadora orientada al aprovechamiento de residuos de la industria maderera, como aserrín, viruta y cortezas, con el objetivo de transformarlos en biocombustibles sólidos de alta densidad energética. La iniciativa se enmarca en la creciente demanda internacional de *pellets* de madera como fuente renovable y, a la vez, aborda el bajo nivel de valorización de residuos forestales en el contexto productivo argentino. El proceso de diseño se abordó mediante una metodología prescriptiva, estructurada en etapas: relevamiento de antecedentes y *benchmarking*, análisis funcional del sistema, generación y evaluación de alternativas conceptuales, selección de la solución y desarrollo de la ingeniería básica y de detalle. Como resultado, se construyó un prototipo físico con capacidad de procesamiento a escala experimental. Las pruebas permitieron analizar parámetros operativos de la máquina, como la potencia en operación, la temperatura de la matriz y la temperatura y el contenido de humedad de la materia prima, cuyos efectos se reflejaron en la calidad del *pellet* obtenido, evaluada en términos de densidad y uniformidad. Los resultados muestran que la máquina desarrollada es técnicamente viable y adaptable a diversos entornos productivos, con potencial de integración en esquemas de economía circular. Asimismo, aporta al desarrollo de tecnologías orientadas a una transición energética más sostenible y fomenta la valorización de residuos en el sector maderero nacional.

Palabras clave: diseño de máquinas, pellets, prototipo experimental.

DESIGN AND MANUFACTURE OF A SAWDUST PELLETIZING MACHINE

Author: PEREZ, Enzo Nicolás.

Advisor: Dr. Ing. CAMPOS, Damián.

Co-Advisor: Ing. GARRIDO, Rocio.

Summary

This work presents the design, development, and fabrication of a pelletizing machine designed to utilize residues from the wood industry, such as sawdust, shavings, and bark, with the objective of converting them into high-energy-density solid biofuels. The initiative aligns with the growing international demand for wood pellets as a renewable energy source and, simultaneously, addresses the low level of valorization of forestry residues within the Argentine productive context. The design process was carried out using a prescriptive methodology structured in stages: a review of prior work and benchmarking, a functional analysis of the system, the generation and evaluation of conceptual alternatives, the selection of the most suitable solution, and the development of basic and detailed engineering. As a result, a physical prototype with experimental-scale processing capacity was built. The tests enabled the analysis of the machine's main operating parameters, including power consumption, die temperature, and the temperature and moisture content of the feedstock, which had a significant impact on the quality of the pellets obtained, as assessed by their density and uniformity. The results demonstrate that the developed machine is technically feasible and adaptable to diverse production environments, with potential for integration into circular economy processes. It also contributes to the development of technologies aimed at a more sustainable energy transition and promotes the valorization of residues in the national wood sector.

Keywords: machine design, pellets, experimental prototype,.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivo General	7
2.2. Objetivos Específicos	7
3. MARCO TEÓRICO	8
3.1. El <i>pellet</i> como biocombustible sólido	8
3.1.1. Origen y potencial	8
3.1.2. Proceso de fabricación	11
3.1.3. Parámetros de diseño y operación	12
3.1.4. Normativas y certificaciones de calidad	13
3.1.5. Aplicaciones energéticas y tendencias de consumo	14
3.2. Metodología de Diseño	16
3.2.1. Clarificación de la tarea	18
3.2.2. Diseño Conceptual	18
3.2.3. Ingeniería Básica	19
3.2.4. Ingeniería de Detalle	20
3.2.5. Fabricación y Montaje	20
4. DESARROLLO	21
4.1. Clarificación de la Tarea	21
4.1.1. Identificación de Necesidades	21
4.1.2. Declaración de Misión	22
4.1.3. <i>Benchmarking</i>	24
4.1.4. Especificaciones Técnicas	27
4.2. Diseño Conceptual	29
4.2.1. Análisis Funcional	29
4.2.2. Análisis de Patentes	30
4.2.3. Generación de Conceptos	32

4.2.4. Matriz morfológica	40
4.2.5. Selección del Concepto Solución	42
4.2.6. Arquitectura de la Máquina	45
4.3. Ingeniería Básica	47
4.4. Ingeniería de Detalle	52
4.4.1. Eje Principal	53
4.4.2. Eje secundario	55
4.4.3. Rodillos	56
4.4.4. Especificaciones técnicas del prototipo	60
4.5. Fabricación y Montaje	61
4.6. Pruebas experimentales	64
4.6.1. Análisis de resultados	66
4.6.2. Diseño de Experimentos (DoE)	69
5. CONTRIBUCIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	73
6. CONCLUSIONES	77
7. REFERENCIAS	78
A. Anexo I: <i>Benchmarking</i>	82
B. Anexo II: Dimensionamiento de componentes.	85
B.1. Dimensionamiento de componentes.	85
B.2. Cálculo de los esfuerzos en el sistema de transmisión.	88
B.3. Dimensionamiento del eje principal.	89
B.4. Dimensionamiento del eje secundario.	92
B.5. Selección del reductor de velocidades.	95
B.6. Selección de rodamientos.	96
C. Anexo III: <i>Planos</i>	98

Índice de Figuras

1.	<i>Pellets</i> de madera.	1
2.	Transformación de rollizos y rendimiento de la manufactura de madera. . .	2
3.	Producción mundial de <i>pellets</i> de madera desde el año 2000 al 2016. . . .	3
4.	Producción de <i>pellets</i> de madera (EU27).	4
5.	Producción de <i>pellets</i> de madera en Estados Unidos.	4
6.	Especificaciones de <i>pellets</i> de madera para uso no industrial.	8
7.	Metodología de diseño adaptada de Pahl y Beitz (2007).	17
8.	Análisis de <i>benchmarking</i> - Matriz de Dispersión.	25
9.	Análisis de <i>benchmarking</i> - Matriz de Correlación.	26
10.	Caja negra.	29
11.	Caja transparente.	29
12.	Matriz plana con rodillos (Oberberger y Thek, 2010).	34
13.	Matriz anular con rodillos (Oberberger y Thek, 2010).	34
14.	Matriz de banda con rodillos (Strefling, 1981).	35
15.	Matriz de rodillo doble (Brotz, 1994).	35
16.	Cuchillas de corte estacionarias.	36
17.	Cuchilla regulable en altura.	36
18.	Corte por hilo oscilante.	37
19.	Cuchilla móvil.	37
20.	Plano inclinado.	38
21.	Cuchilla evacuadora.	39
22.	Cinta transportadora.	39
23.	Matriz morfológica.	40
24.	Resumen Conceptos Solución.	41
25.	Arquitectura del concepto solución seleccionado.	46
26.	Perspectiva explotada del concepto solución.	46
27.	Diagrama de flujo para el predimensionamiento del prototipo.	48
28.	Rodillo de compactación.	49
29.	Matriz de compactación.	49

30.	Eje principal.	50
31.	Eje secundario.	50
32.	Componentes del bloque de corte y evacuación.	51
33.	Vista principal en corte del prototipo.	52
34.	Modelo para la verificación del eje principal.	54
35.	Análisis de esfuerzos y deformaciones del eje.	54
36.	Modelo para la verificación del eje secundario.	55
37.	Análisis de esfuerzos y deformaciones del eje secundario.	56
38.	Esquema de la zona de contacto y distribución de presiones en los rodillos.	57
39.	Distribución de tensiones de compresión en el eje Z (S_{ZZ}).	59
40.	Distribución de tensiones de corte en el plano Z-X (T_{ZX}).	59
41.	Tensiones equivalentes de Von Mises en los rodillos.	59
42.	Dimensiones generales del prototipo.	60
43.	Registro fotográfico de la fabricación y montaje.	62
44.	Registro fotográfico de la fabricación y montaje (Continuación).	63
45.	Detalle de la instrumentación empleada en las pruebas experimentales.	65
46.	Imágenes termográficas de la temperatura final de la matriz en cada ensayo.	67
47.	Registro fotográfico de los <i>pellets</i> obtenidos en los ensayos.	68
48.	Superficie de respuesta.	69
49.	Análisis de sensibilidad.	70
50.	Áreas representativas de la matriz.	74
51.	Rediseño propuesto para la matriz.	75
52.	<i>Benchmarking</i>	82
53.	<i>Benchmarking</i> (Continuación).	83
54.	<i>Benchmarking</i> (Continuación).	84
55.	Matriz y rodillos con dimensiones características.	85
56.	Dimensiones de los agujeros de la matriz.	86
57.	Dimensiones características del módulo de compactación.	88
58.	Cadena cinemática de la máquina.	89
59.	Diagrama de esfuerzos de los ejes de la máquina.	90
60.	Reductor sin fin - corona seleccionado.	95

61. Rodamientos radiales del eje secundario.	96
62. Rodamientos radiales del eje principal.	97
63. Rodamiento axial del eje principal.	97

Índice de Tablas

1.	Mayores consumidores de <i>pellets</i> de la EU27 (1000 MT).	15
2.	Parámetros analizados en el <i>benchmarking</i>	25
3.	Requerimientos del Comitente.	28
4.	Especificaciones técnicas objetivo.	28
5.	Resumen de Patentes sobre Máquinas Peletizadoras.	30
6.	Resumen de Patentes sobre Máquinas Peletizadoras (cont.)	31
7.	Matriz de Evaluación de Conceptos	43
8.	Determinación de la importancia de los criterios.	44
9.	Matriz de Evaluación.	45
10.	Especificaciones técnicas del prototipo.	60

1. INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son fuentes de energía que se producen a partir de materia orgánica. Los *pellets* de madera son biocombustibles sólidos, de forma cilíndrica, generalmente compuestos por viruta de madera, aserrín, corteza de árboles y herbáceos, entre otros (ver Figura 1). En adelante, la materia prima se denominará madera, abarcando sus variantes enunciadas anteriormente. Estos se conforman a través de un proceso de compactación y secado, llamado peletización, que reduce la humedad y aumenta la densidad aparente; así, aunque el poder calorífico específico (base seca) es similar al de la madera original, mejora el poder calorífico inferior en base húmeda y, principalmente, la densidad energética por unidad de volumen, favoreciendo el manejo y la combustión uniformes (Oberberger y Thek, 2010).



Figura 1. *Pellets* de madera.

Fuente: *Pellet Fuel Institute* (www.pelletheat.org).

Entre los principales factores que influyen en la calidad de los *pellets* se encuentran el tipo de materia prima, su granulometría, el tamaño y la humedad relativa, antes y después de ser procesados. Se han creado diversos estándares que determinan las características del *pellet* dependiendo de su aplicación.

Tener *pellets* de una calidad aceptable, que cumplan con los requisitos que exigen las normas que los regulan, aseguran una elevada eficiencia de su transformación en energía térmica útil y reduce las emisiones respecto al uso tradicional de combustibles orgánicos (Capitanich et al., 2022).

El calor de combustión obtenido experimentalmente se constituye en un indicador de cuán eficiente es un combustible. Este se define como la relación entre la cantidad de calor que cede un combustible, cuando se produce la combustión, con una unidad de masa de

este mismo. Según ensayos realizados se obtuvieron valores de calores de combustión entre 4300 a 4400 cal/g para los *pellets* de aserrín y de 3500 cal/g para leña de algarrobo. Esto evidencia el beneficio que tienen los biocombustibles de alta densidad frente a los biocombustibles sin procesar (Burba et al., 2018).

La utilización de *pellets* de madera como combustible está enfocada en reducir el consumo de energía y minimizar el impacto ambiental que generan normalmente los combustibles fósiles. Además, no solo reducen las emisiones al realizar la combustión, sino que también permiten utilizar como materia prima los desechos de la industria maderera.

La industria forestal genera una gran cantidad de residuos provenientes del aserrado y manufactura de la madera, como así también de la poda y raleo de bosques. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 2, respecto al aserrado y fabricación de molduras en pino, se observa un rendimiento de producto final de poco menos del 30 % respecto al rollizo con corteza, el cuál es la materia prima inicial. Esto demuestra la gran cantidad de residuos que genera el proceso productivo de los aserraderos, lo cual presenta una oportunidad de reciclaje significativa (Maslatón et al., 2011).

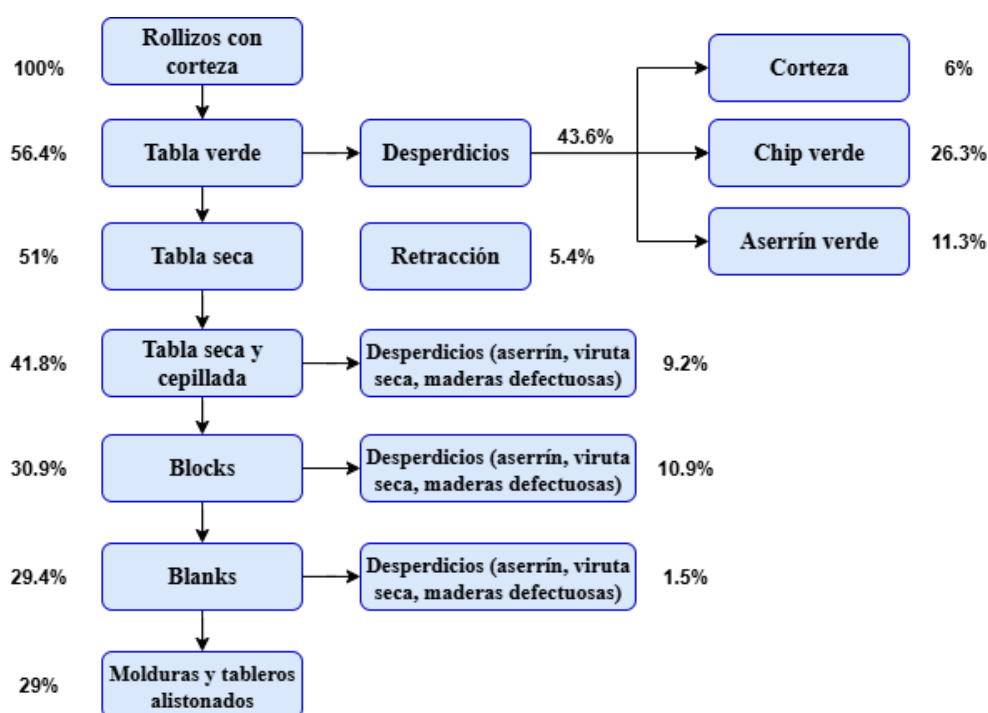


Figura 2. Transformación de rollizos y rendimiento de la manufactura de madera.

Fuente: Adaptada de Maslatón et al. (2011).

El elevado volumen de residuos provenientes del procesamiento primario de la madera no solo plantea desafíos ambientales, sino que también abre posibilidades concretas para su aprovechamiento energético. En este contexto, la valorización de subproductos lignocelulósicos mediante su transformación en biocombustibles sólidos, como los *pellets* de madera, se ha consolidado como una estrategia eficiente y sostenible. Esta tendencia se refleja en el crecimiento sostenido de la producción mundial de *pellets*, tal como se observa en la Figura 3.

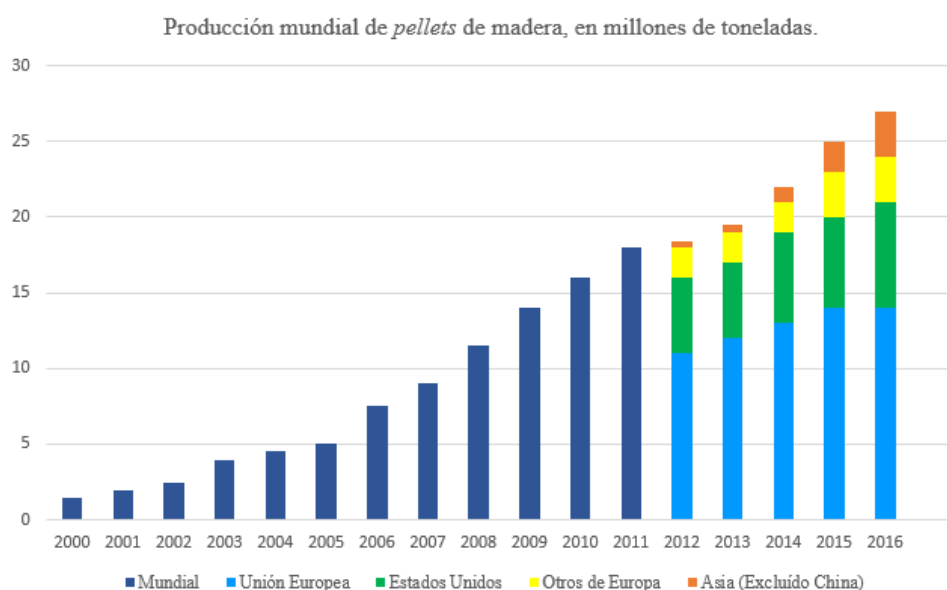


Figura 3. Producción mundial de *pellets* de madera desde el año 2000 al 2016.

Fuente: [AEBIOM Statistical Report \(2017\)](#).

El uso de *pellets* de madera como combustible constituye una solución sostenible que respalda los objetivos ambientales de la Unión Europea (EU27). Esta última se destaca como uno de los principales productores y consumidores a nivel mundial, con sus países miembros alcanzando en el 2022 una producción de más 20 millones de toneladas, lo que demuestra su liderazgo independiente en este sector, ver Figura 4.

Durante este mismo año se marcó un crecimiento significativo para la industria de *pellets* de madera por parte de otro de los grandes productores, Estados Unidos. La producción nacional se expandió un 8,7 % con respecto al año previo, mientras que las exportaciones de este producto experimentaron un incremento aún mayor, alcanzando el 16,5 % en el mismo periodo ([Flach y Bolla, 2022](#)). Como resultado, Estados Unidos logró una producción anual de *pellets* de madera de casi 14 millones de toneladas, ver Figura 5.

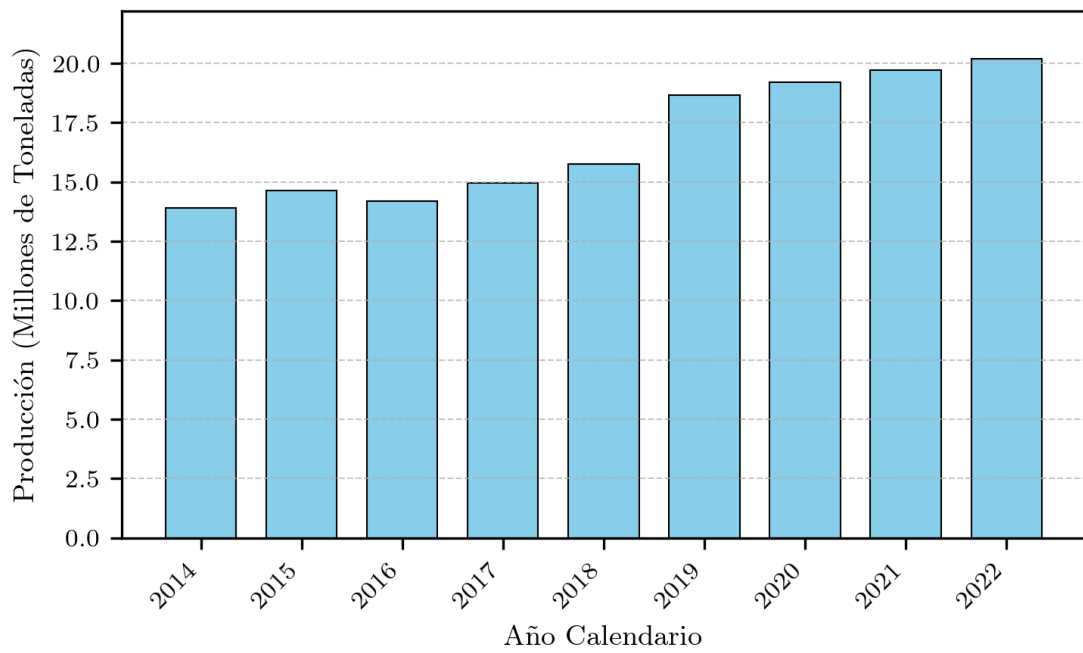


Figura 4. Producción de *pellets* de madera (EU27).

Fuente: Adaptado de [Flach y Bolla \(2022\)](#).

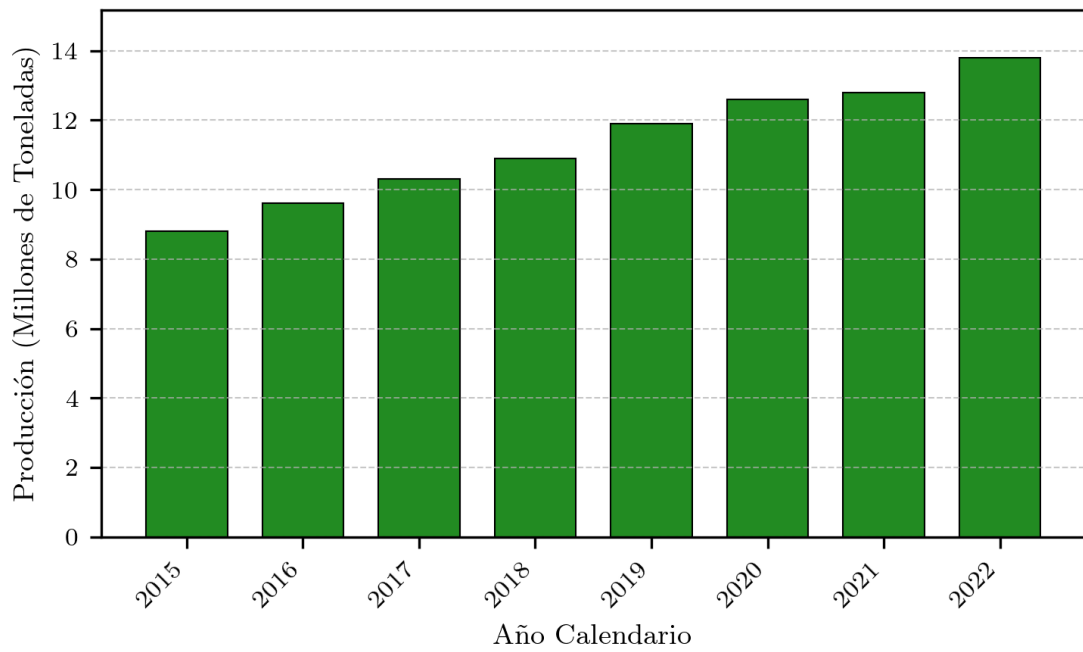


Figura 5. Producción de *pellets* de madera en Estados Unidos.

Fuente: Adaptado de [Aguilar et al. \(2023\)](#).

El uso de biocombustibles sólidos, como los *pellets* de madera, se concentra principalmente en plantas de cogeneración, en aplicaciones industriales de generación de calor y en sistemas de calefacción tanto residencial como de gran escala. Estos últimos se caracterizan por utilizar el calor generado durante la combustión para transferirlo, mediante convección, a corrientes de aire que atraviesan el equipo y se liberan al ambiente a calefaccionar.

En Argentina, una parte considerable de los residuos generados por la industria forestal aún no se valoriza económicamente (Maslatón et al., 2011). No obstante, el país cuenta con un desarrollo forestal significativo, particularmente en la región noreste. La provincia de Misiones lidera el sector en términos de valor agregado bruto, seguida por la provincia de Corrientes (Argentina, 2022).

De forma paralela, otras provincias exploran alternativas para la producción de biocombustibles sólidos, a saber:

- En Tucumán, por ejemplo, se investiga el aprovechamiento energético de la caña de azúcar (Torres et al., 2012);
- En Mendoza se han realizado estudios enfocados en el reciclaje de residuos de la industria del ajo (Burba et al., 2018);
- En Río Negro se analiza la valorización térmica de desechos forestales (Capitanich et al., 2022).

La disponibilidad de materia prima en distintas regiones del país representa una oportunidad estratégica para fomentar el desarrollo del mercado interno de biocombustibles sólidos y promover políticas públicas orientadas al reciclaje y la sustentabilidad.

Por otra parte, los *pellets* de madera presentan ventajas competitivas frente a otros combustibles, dado que no son tóxicos ni implican riesgos de explosión. Estas características los convierten en una alternativa más segura para su producción, transporte y almacenamiento, favoreciendo su adopción tanto a nivel industrial como domiciliario.

El proceso productivo de los *pellets* de madera comprende una secuencia de etapas destinadas a transformar residuos lignocelulósicos (tales como virutas, astillas o cortezas) en biocombustibles sólidos estandarizados, de alta densidad energética, fácil manipulación y

bajo impacto ambiental. Este proceso puede agruparse en tres grandes fases: acondicionamiento, procesamiento y post-procesamiento, cuestiones que se desarrollarán con más detalle en el marco teórico.

En la etapa de procesamiento, el peletizado representa la etapa de mayor complejidad técnica y energética, y es determinante para la calidad del producto final. Las características deseables de los *pellets* (tales como alta densidad aparente, resistencia mecánica y bajo contenido de humedad) dependen en gran medida del diseño de la máquina, de los parámetros operativos y de la calidad de la materia prima de entrada.

En este contexto, y con el objetivo de capitalizar la creciente demanda de biocombustibles sólidos como alternativa energética sostenible, se acordó con una Pequeña y Mediana Empresa (PyME) de la provincia de Misiones (en adelante, el Comitente) el desarrollo de una máquina peletizadora de aserrín.

Este proyecto contempla el diseño, construcción y validación de un equipo robusto y adaptable a distintas características de materia prima. La solución propuesta apunta a cubrir las necesidades productivas de la empresa, contribuyendo además al aprovechamiento energético de los residuos forestales generados en la región.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Diseño y fabricación de una máquina peletizadora de aserrín, para el aprovechamiento de residuos madereros, conforme a los requisitos técnicos establecidos por el Comitente.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso de conformación de *pellets* de madera.
 - En base a un análisis funcional, desarrollar alternativas de solución (Diseño Conceptual), que permitan establecer la arquitectura de la máquina para llevar a cabo el proceso de transformación de la madera.
 - Elaborar la ingeniería básica y de detalle de la máquina en función de la arquitectura definida precedentemente.
 - Realizar el seguimiento de la fabricación de un prototipo físico, y luego de la puesta a punto del mismo.
-

3. MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta un relevamiento del conocimiento actual sobre los *pellets* de madera como biocombustible sólido. Se analizan sus orígenes, evolución tecnológica, características físico-químicas, aplicaciones energéticas, marco normativo y ventajas comparativas frente a otras fuentes energéticas. Además, se presenta la metodología proyectual empleada para llevar a cabo el diseño y desarrollo de la máquina peletizadora de aserrín.

3.1. El *pellet* como biocombustible sólido

3.1.1. Origen y potencial

Tal como se mencionó anteriormente, el término *pellet* hace referencia a una masa comprimida de material, típicamente con forma cilíndrica o esférica, y de dimensiones normalizadas (ver Figura 6).

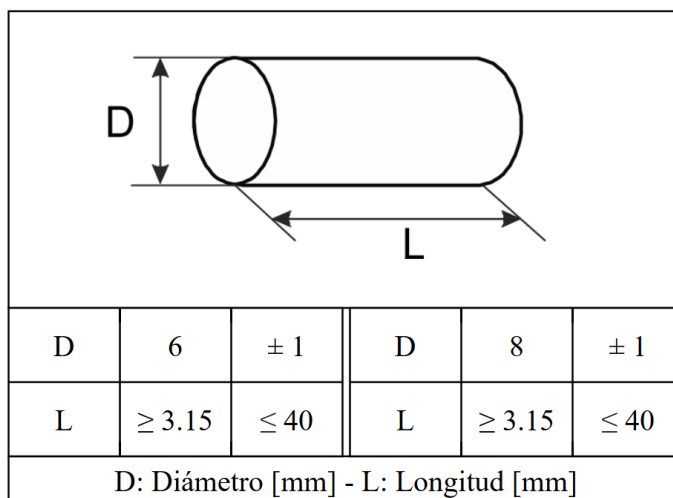


Figura 6. Especificaciones de *pellets* de madera para uso no industrial.

Fuente: Adaptado de [Oberberger y Thek \(2010\)](#).

En el caso particular de los *pellets* de madera, se trata de biocombustibles sólidos obtenidos mediante la densificación de residuos lignocelulósicos, como el aserrín, virutas o corteza, provenientes de procesos de aserrado y manufactura.

Estos *pellets* presentan una serie de características técnicas que los diferencian de la madera sin procesar: poseen baja humedad (8–12 %), alta densidad energética (hasta 19 MJ/kg), tamaño y forma homogéneos, y buenas propiedades de manipulación y

almacenamiento. Estas cualidades los convierten en una alternativa eficiente y estandarizada para su uso en calefacción residencial, generación eléctrica y procesos industriales térmicos.

La composición química de los *pellets* depende de la naturaleza de la biomasa utilizada, aunque en general están compuestos por tres polímeros principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Este último actúa como aglomerante natural durante el proceso de peletizado, gracias a su capacidad de ablandarse con el calor generado por fricción. En maderas blandas, el contenido de lignina puede alcanzar valores de entre 25 % y 35 %, mientras que en maderas duras se encuentra entre 18 % y 25 % (Rowell, 2005).

La industria de los *pellets* de madera comenzó a desarrollarse en la década de 1980 como una respuesta directa a las crisis energéticas ocurridas en la década de 1970. La primera de estas crisis tuvo lugar en octubre de 1973, cuando los países árabes miembros de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) impusieron un embargo petrolero a Estados Unidos y Europa Occidental como represalia por su apoyo a Israel durante la Guerra de Yom Kippur. Esta medida provocó un incremento cuádruple en el precio del barril de crudo y desencadenó una recesión económica global. La segunda crisis energética se produjo en 1979, impulsada por la Revolución Iraní y el posterior conflicto bélico entre Irán e Irak. Entre mediados de 1978 y 1981, el precio del petróleo se multiplicó por un factor de 2,7.

Ante esta coyuntura, la biomasa emergió como una fuente energética alternativa. Este tipo de energía utiliza materia orgánica —como residuos agrícolas y forestales— para generar calor y/o electricidad. En este contexto, los *pellets* de madera se consolidaron como el biocombustible sólido más utilizado en plantas de generación térmica a partir de biomasa. Se elaboran mediante la compresión de subproductos de la industria forestal, como aserrín o virutas de madera, generalmente sin necesidad de aditivos. El resultado es un producto cilíndrico de dimensiones homogéneas, con un contenido de humedad muy bajo y un poder calorífico superior al de otros combustibles biomásicos.

El uso de *pellets* se ha expandido globalmente como una alternativa renovable, eficiente y neutra en emisiones de carbono. El CO₂ liberado durante su combustión corresponde al que fue previamente absorbido por el árbol durante su crecimiento, por lo que no incrementa el contenido neto de carbono en la atmósfera. Gracias a sus múltiples ventajas

—como su bajo costo, estabilidad de precio, facilidad de manipulación y densidad energética— el consumo de *pellets* ha crecido significativamente, especialmente en el mercado europeo, con el Reino Unido como uno de los principales países consumidores.

Ventajas del uso de *pellets* de madera:

- **Recurso renovable y accesible:** La materia prima para producirlos se obtiene mayoritariamente de residuos de la industria forestal o madera virgen.
 - **Valorización de subproductos:** Permite reutilizar materiales que anteriormente eran descartados, cerrando el ciclo productivo.
 - **Menor costo relativo:** A igualdad de energía térmica generada, el *pellet* resulta más económico que combustibles fósiles como el gas natural o el petróleo.
 - **Mayor calor de combustión:** Este tipo de biocombustible puede alcanzar valores de calor de combustión de hasta 4400 cal/g, frente a las 3500 cal/g que presenta la leña ([Burba et al., 2018](#)).
 - **Reducción de emisiones de CO₂:** Por su origen biológico, su combustión contribuye al cumplimiento del Protocolo de Kioto.
 - **Facilidad de transporte y almacenamiento:** Su alta densidad permite reducir el volumen requerido, y su presentación en bolsas o a granel facilita su logística. Además, no presenta peligro de explosión como suele ser el caso de otros combustibles fósiles.
 - **Estabilidad de precios:** Al ser un negocio emergente y estable, a diferencia del petróleo o el gas, el *pellet* presenta menor volatilidad en su cotización.
 - **Combustión eficiente:** Su baja humedad (8–12 %) permite alcanzar altas temperaturas con una mínima generación de cenizas y residuos, facilitando el mantenimiento de calderas y estufas.
 - **Reducción de la dependencia energética:** Su uso disminuye la necesidad de importar combustibles fósiles.
-

- **Recurso globalmente disponible:** Al ser de origen vegetal, puede producirse en cualquier región del mundo, sin limitaciones geográficas significativas. Si bien no todo tipo de madera genera la misma calidad de *pellets*, igualmente es posible producirlos como combustible.

3.1.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de *pellets* de madera comprende una serie de etapas destinadas a acondicionar y compactar la biomasa, optimizando sus propiedades físicas y energéticas. Las fases principales del proceso, según [Oberberger y Thek \(2010\)](#), son las siguientes:

1. **Preparación de la materia prima:** Las materias primas más comunes son viruta y aserrín de madera, en el caso de querer producir *pellets* de mayor calidad estos deben ser producidos sin corteza, esto se debe al gran contenido de cenizas que produce este material al realizar la combustión. La etapa de preparación incluye el almacenamiento, cribado y limpieza del material de entrada.
 2. **Acondicionamiento:** En el caso de la viruta suele estar seca, por lo que su preparación solo consta de la molienda para reducir el tamaño de partícula. Luego, la materia prima debe tener un acondicionamiento de humedad. El aumento de este parámetro se suele realizar con una corriente de agua rociada directamente sobre el material. En el caso contrario, se puede utilizar una estufa para generar que se evapore el contenido de humedad excedente. Se suele requerir un valor de humedad entre 8 % y 12 %.
 3. **Peletización:** La materia prima ya acondicionada se introduce a la peletizadora con el fin de darle forma al producto final. Esta máquina comúnmente tiene una matriz y rodillos, entre los cuales el material se distribuye uniformemente y es compactado. La fricción generada durante el proceso produce un aumento de temperatura lo cual favorece el ablandamiento de la lignina, permitiendo una mejor unión entre las partículas. Para que esto suceda, se debe procurar que la materia prima alcance una temperatura de al menos 70 °C. Una vez que el material densificado abandona la matriz debe ser cortado a su longitud final.
-

4. **Enfriado:** Los *pellets* calientes son enfriados de manera natural o mediante una corriente forzada de aire para evitar condensación, agrietamiento o deformación. Este proceso mejora la durabilidad mecánica y reduce el contenido de humedad hasta un 2 %.
5. **Clasificación y envasado:** Por último, con el producto final producido, se separa el polvo y material quebrado y se comienza con la etapa de envasado. Normalmente, los *pellets* se comercializan en fracciones de varios kilos, aunque también se pueden almacenar a granel en silos.

3.1.3. Parámetros de diseño y operación

Para un funcionamiento eficiente del sistema de peletizado, deben considerarse dos grupos principales de parámetros:

- **Parámetros de diseño del equipo:** El tipo y geometría de la matriz (plana o anular), la cantidad y distribución de orificios, las dimensiones de rodillos y matriz, y la velocidad de rotación son factores determinantes para la capacidad de producción y el consumo de potencia. Además, la relación de compresión de la matriz, que es la relación entre el diámetro y el largo de los orificios, tiene un impacto significativo en la calidad del *pellet* a producir, ya que determina la cantidad de fricción dentro de los canales. Materia prima con poca capacidad de unión propia, suele requerir mayores longitudes de canal.
- **Parámetros de la materia prima:** Para realizar una producción sin interrupciones es necesario contar con una alimentación constante de materia prima habiendo ajustado su contenido de humedad y temperatura de entrada. Previo a esto, como se mencionó anteriormente, se debe ajustar tamaño de partícula y tener en cuenta la naturaleza de su composición química (en especial, el contenido de lignina).

En algunos casos —especialmente con materias primas de baja lignina o cuando se busca mejorar la cohesión— se emplean aditivos naturales de bajo costo (p. ej., almidón de maíz o harinas), en dosificaciones típicas de 0,5–2 % m/m. Su uso debe declararse y cumplir con [ISO-17225-1 \(2021\)](#), manteniendo los límites de la clase de *pellet* correspondiente

3.1.4. Normativas y certificaciones de calidad

Para garantizar la calidad del producto y su desempeño en aplicaciones térmicas, los *pellets* deben cumplir con normativas técnicas que establecen criterios de composición, propiedades físicas y contenido energético. Las normas más utilizadas son:

- **ISO-17225-1 (2021):** *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales.*

Norma internacional que establece las especificaciones (Contenido de humedad, poder calorífico, densidad aparente, dimensiones, composición química, aditivos) y clases de biocombustibles sólidos provenientes de diversas fuentes. Se segmentan los tipos de *pellets* en base al origen y a la naturaleza de la materia prima.

- **ISO-17225-2 (2014):** *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pellets de madera.*

Norma internacional que establece las especificaciones y clases de calidad exclusivamente para *pellets* de madera, que son utilizados tanto doméstica como industrialmente. Se entiende como madera aquellas materias primas tales como biomasa leñosa virgen, residuos de la industria del procesamiento de madera y madera usada que no fue tratada químicamente.

- **ISO-17829 (2015):** *Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y diámetro de pellets.*

Esta normativa internacional establece la base técnica de los métodos mediante los cuales se debe determinar y verificar el diámetro y la longitud de los *pellets* producidos.

- **ISO-17831 (2015):** *Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1: Pellets.*

El objetivo principal de esta norma es definir una metodología de prueba para la determinación de la durabilidad mecánica de los *pellets*, lo cuál se caracteriza como un parámetro fundamental para garantizar la calidad y el rendimiento de este producto. Establece la disposición de los aparatos a utilizar, la forma en la que se debe

preparar la muestra, los procedimientos de ensayo y el cálculo de la durabilidad mecánica.

El cumplimiento de estas normas permite asegurar la compatibilidad del producto con estufas, calderas y sistemas de combustión automáticos, así como también facilita la comercialización internacional.

3.1.5. Aplicaciones energéticas y tendencias de consumo

Los biocombustibles sólidos se utilizan comúnmente como fuente de energía en sistemas de calefacción debido a sus ventajas sobre la leña. El uso de *pellets* favorece a la automatización de los hornos y calderas, dado que tienen humedad y tamaño de partícula constante, requieren menos espacio de almacenamiento, lo que conlleva a mayor facilidad de manipulación. En contraste, la alimentación automática de la leña en períodos prolongados es inviable debido a su demanda de espacio y las complejidades inherentes a su manejo.

Los *pellets* se utilizan en múltiples ámbitos, abarcando calefactores de pequeña escala, con una capacidad nominal de hasta 100 kWh. Estos hornos se utilizan para calefacción residencial y engloban un mercado de sistemas de calefacción en continuo crecimiento en países como Austria, Alemania y Suecia.

Los hornos que tienen una capacidad térmica de entre 100 y 1000 kWh son denominados de escala media. Por lo general, estos hornos se utilizan en sistemas de calefacción industrial o de mayor escala que la anterior, como la de los edificios residenciales y hospitales. La ventaja de estos tipos de instalaciones es que pueden funcionar con *pellets* de menor calidad sin ningún problema, lo que hace más atractivo el hecho de reutilizar los desechos del proceso productivo de la madera. Es usual encontrar estos tipos de sistemas con almacenamiento en forma de silos, dado que utilizan mayor cantidad de *pellets* anualmente.

Por último, los hornos a gran escala son aquellos que tienen una capacidad mayor a 1 MW. Normalmente, se suelen utilizar en plantas de cogeneración y comparten las cualidades con las calderas de mediana escala ([Obernberger y Thek, 2010](#)).

En cuanto al consumo de *pellets*, la Unión Europea es el mayor productor y consumidor del mundo. Produce un 44 % de los *pellets* del mundo y consume el 50 %. Durante el año

2023, la participación del consumo residencial y comercial de *pellets* alcanzó el 59 % en dicha región. Esto se debe a que este tipo de calefacción es la mejor opción para las zonas rurales ricas en biomasa con menores conexiones al sistema energético, ([AEBIOM Statistical Report, 2024](#)). Entre los principales países consumidores de biocombustibles se encuentran Italia, Países Bajos y Alemania, tal como se muestra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Mayores consumidores de *pellets* de la EU27 (1000 MT).

Fuente: Adaptado de ([Flach y Bolla, 2022](#)).

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020^e	2021^e
Italia	3,300	3,200	3,400	3,300	3,400	3,400	3,400
Países Bajos	120	190	360	610	1,240	2,560	2,900
Alemania	1,760	2,000	2,085	2,195	2,190	2,240	2,900
Dinamarca	2,500	2,570	3,160	3,075	3,000	2,800	2,750
Francia	908	1,207	1,335	1,430	1,800	1,900	2,100
Suecia	1,650	1,605	1,530	1,785	1,730	1,500	1,600
Bélgica	1,600	1,340	1,375	1,490	1,550	1,500	1,200
Austria	850	895	960	950	930	1,015	1,190
Total	15,487	15,441	17,190	18,513	21,728	22,469	23,128

^eEstimado por EU FAS Posts.

3.2. Metodología de Diseño

El diseño es una secuencia de actividades que permite llevar a cabo la creación de un producto. Este desarrollo debe estar enmarcado a través de una metodología sistémica, en la que se fomentan las habilidades y la creatividad de quien está diseñando. Además, este tipo de metodología permite realizar una evaluación objetiva de los resultados obtenidos y ayuda a la comprensión del diseño. Este enfoque sistémico propone llevar a cabo un desarrollo paso a paso hasta lograr un resultado que se considere satisfactorio. De esta manera, permite repetir los pasos de trabajo continuamente creando bucles de iteración que retroalimentan cada etapa. Para que el proceso de diseño sea eficiente y efectivo se tiene como objetivo mantener los bucles de iteración lo más pequeños posible.

Por otra parte, suele ser útil enfocar las actividades de diseño a un conjunto de características específicas con el fin de optimizar un producto. Este es el objetivo principal de las técnicas *Design for (DfX)*, dentro de las que se reconoce una amplia gama de consideraciones. Entre las técnicas más reconocidas se encuentran:

- Diseño para Manufactura (*DfM-Design for Manufacturing*)
- Diseño para Ensamblaje (*DfA-Design for Assembly*)
- Diseño para Seguridad (*DfS-Design for Security*)
- Diseño para Costos (*DfC-Design to Cost*)
- Diseño para Calidad (*DfQ-Design for Quality*)

Para el desarrollo del presente trabajo se adoptará la metodología proyectual propuesta por [Pahl y Beitz \(2007\)](#) y se realizarán algunas adaptaciones específicas (ver Figura 7). Este proceso consta de cinco etapas principales, que incluyen múltiples tareas, las cuales se desarrollarán a continuación.

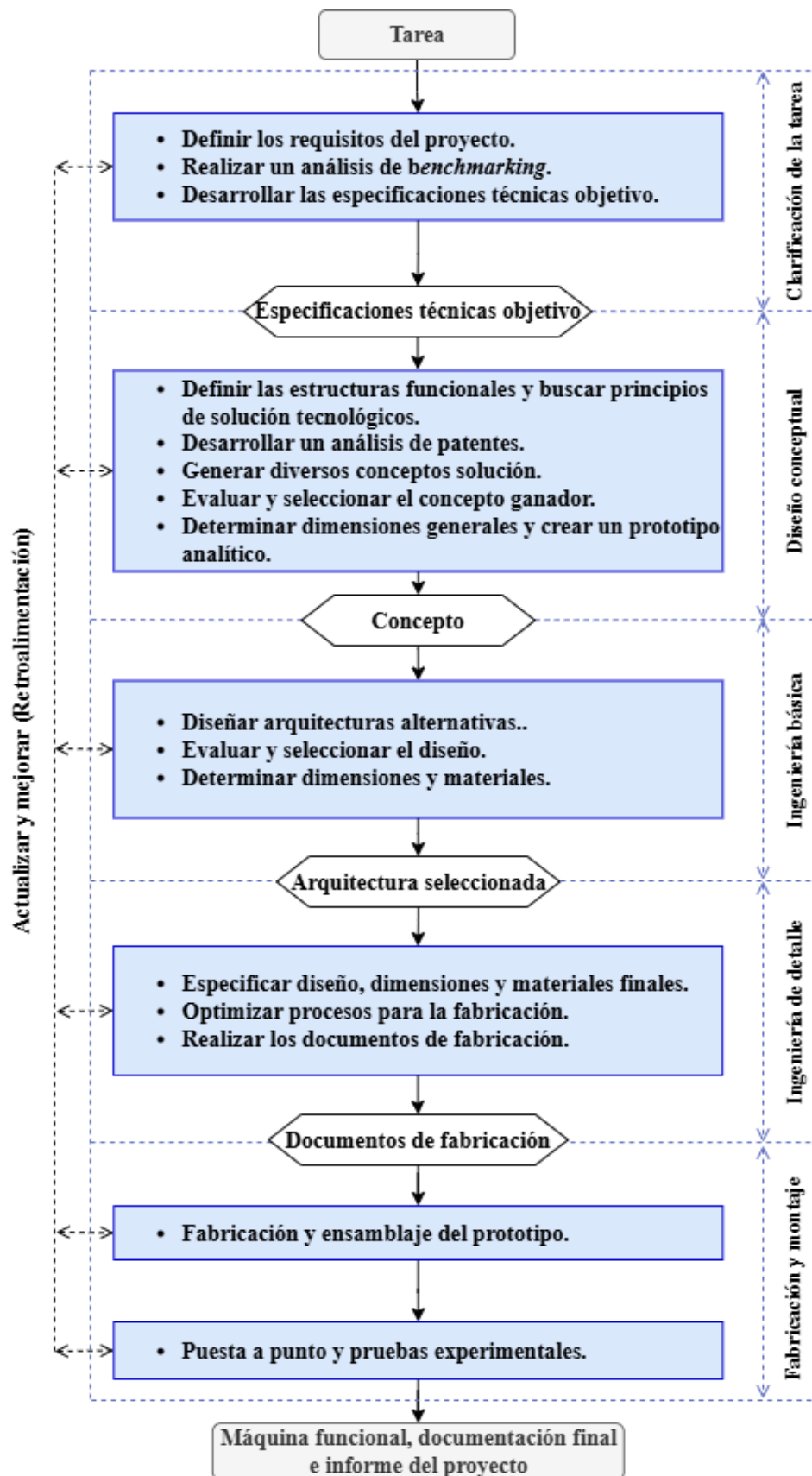


Figura 7. Metodología de diseño adaptada de Pahl y Beitz (2007).

3.2.1. Clarificación de la tarea

El propósito general de esta primer etapa de diseño es recopilar la mayor cantidad de información acerca de los requisitos que deberá cumplir la máquina, junto con todas las necesidades del Comitente. Esto permitirá identificar y establecer las suposiciones y restricciones a las que estará sujeto el diseño y en base a esta información definir la Declaración de Misión.

Es de utilidad analizar diseños existentes para identificar parámetros de funcionamiento medibles y de esta forma establecer objetivos de diseño realizables. Además, se pueden definir barreras tecnológicas y evaluar la viabilidad técnica del proyecto. Este conjunto de datos sirve para mejorar el entendimiento de la funcionalidad de la máquina y de los requisitos del Comitente. Para recopilar esta información se realizará un *Benchmarking*.

Una vez realizadas las actividades mencionadas anteriormente, se podrán elaborar las especificaciones técnicas objetivo de la máquina, las cuales se identifican como la salida de la etapa de Clarificación de la Tarea.

3.2.2. Diseño Conceptual

Partiendo del listado de especificaciones definido previamente, en la fase de Diseño Conceptual se definen las estructuras funcionales, los principios de funcionamiento y alternativas de conceptos solución, centrandó la mirada en el modo de operación y aspectos tecnológicos básicos. La generación de conceptos puede ser nutrida de la información obtenida en el *Benchmarking* y en el Análisis de Patentes, pero esta vez analizando las soluciones técnicas implementadas para dar respuesta a la función identificada previamente.

La representación de una solución puede adoptar muchas formas, por lo que será necesario establecer con qué criterios serán evaluados estos conceptos, para converger en uno solo, a partir de su factibilidad técnica, económica y del cumplimiento de los requisitos. En algunos casos, diferentes variantes parecen igualmente prometedoras, por lo que pueden surgir nuevas formas a partir de la combinación de conceptos.

A través de un prototipo analítico se realizará una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés, para llevar a cabo la representación del concepto seleccionado. Esto permite que se analicen algunos aspectos interesantes del producto. En particular,

se realizará un prototipo analítico, utilizando un *software* de diseño asistido por computadora, lo que implicará la modelización 3D con el fin de verificar el correcto ensamblaje de los componentes y la optimización de geometrías para la fabricación.

Según distintos autores, los mayores esfuerzos del proceso de diseño deben enfocarse en estas dos primeras etapas, dado que en la misma quedan definidas las bases del funcionamiento de la máquina. A partir de allí, el proyecto adquiere una “rigidez” tal que, cualquier modificación necesaria en las etapas de Ingeniería Básica y de Detalle, implican un aumento de la duración del bucle iterativo y un costo significativo complementario.

3.2.3. Ingeniería Básica

A partir del concepto solución seleccionado en la etapa anterior, se determina la configuración preliminar de la máquina. Esto permite tener una visión general de las formas y dimensiones del diseño, de los materiales a utilizar y del proceso de fabricación necesario. Es importante tener en cuenta que existe una relación muy fuerte entre estos tres aspectos, dado que una forma específica debe tener una factibilidad para ser fabricada, por la técnica que se utilice y por el material que se requiera. Esta vinculación entre los aspectos mencionados anteriormente genera nuevas limitaciones o condicionantes del diseño.

Frecuentemente es necesario producir varias disposiciones preliminares para evaluarlas simultáneamente, con el fin de obtener más información sobre las ventajas y desventajas de las diferentes variantes, [Pahl y Beitz \(2007\)](#).

Como se mencionó anteriormente, para realizar los diseños se suele dar un enfoque con el fin de obtener soluciones que contemplen características especiales, utilizando las técnicas *DfX*. En este caso, se prioriza la técnica de Diseño para Manufactura y Ensamblaje (*DfMA*) dado que integrando consideraciones de fabricación desde las primeras etapas del diseño, se minimiza la complejidad y el tiempo asociados a estos aspectos.

En particular, el uso de esta técnica busca reducir costos minimizando la cantidad de piezas, reduciendo la complejidad geométrica de las piezas, optimizando la cantidad de operaciones de fabricación y montaje, disminuyendo la cantidad de piezas ad-hoc y seleccionando adecuadamente los materiales con criterios técnicos y económicos.

Finalmente, como resultado de esta etapa se tendrá la arquitectura de la máquina, donde se asignan elementos físicos a los bloques funcionales definidos previamente. Como

salida de esta etapa, se presenta un esquema de la configuración que toman estos elementos físicos y un listado preliminar de los principales componentes, con sus dimensiones generales.

3.2.4. Ingeniería de Detalle

En esta etapa se definirá la geometría y las dimensiones finales de todas las piezas individuales. Además, se especifican los materiales, las propiedades superficiales y todas las tolerancias con las que deben ser fabricadas las piezas para una correcta vinculación y ensamblaje. Es importante destacar que se puede tener una retroalimentación con las otras etapas de diseño, dado que se continúa evaluando la arquitectura de la máquina hasta obtener los planos finales. Como salida se generarán los documentos de fabricación finales para la construcción del prototipo físico.

3.2.5. Fabricación y Montaje

Durante esta etapa se realizará el desarrollo del prototipo físico con el fin de evaluar toda la etapa de diseño y retroalimentar las correcciones que se consideren necesarias para asegurar la funcionalidad de la máquina.

A diferencia de los prototipos analíticos, un prototipo físico permite obtener un objeto tangible, el cual en este caso dará forma a la máquina final. Este será de utilidad para realizar pruebas, experimentar y validar la funcionalidad del conjunto. Además, un prototipo de esta clase permite exhibir fenómenos imprevistos que se deberán solucionar para procurar la correcta vinculación entre los componentes de la máquina.

Una vez fabricado y montado el prototipo físico, se realizarán pruebas de funcionamiento para evaluar el desempeño de la máquina y medir parámetros de interés. A partir de las observaciones y mediciones obtenidas, se desarrollará un informe de los trabajos a futuro que se deberán realizar para mantener una producción continua de la máquina.

4. DESARROLLO

En esta sección se desarrolla el Proyecto Integrador Profesional conforme al eje metodológico adoptado. A partir de los requerimientos funcionales identificados y las condiciones de operación previstas, se abordan las decisiones de diseño mecánico, la selección de componentes, la evaluación de alternativas y la validación técnica del sistema propuesto. Se incluyen, además, los criterios de dimensionamiento, los cálculos justificativos y los aspectos constructivos y operativos más relevantes. El desarrollo integra herramientas adquiridas durante el trayecto formativo, junto con recursos específicos requeridos para resolver el problema tecnológico planteado.

4.1. Clarificación de la Tarea

4.1.1. Identificación de Necesidades

El punto de partida del proyecto fue la identificación de una necesidad concreta vinculada al aprovechamiento de subproductos de la industria forestal mediante el diseño de una máquina peletizadora de aserrín. Este proceso se llevó a cabo a través de una entrevista semiestructurada realizada a un profesional técnico agropecuario, quien propuso el desarrollo de la máquina como una solución tecnológica viable para valorizar residuos lignocelulósicos generados en el entorno productivo de una cooperativa vinculada a un aserradero local.

El entrevistado, en su rol de asesor técnico, detectó la oportunidad de implementar un sistema de peletizado como estrategia para agregar valor a los residuos, orientado tanto al autoconsumo energético como a la generación de una fuente de ingresos mediante la comercialización de biocombustibles sólidos. El aserradero en cuestión genera grandes volúmenes de aserrín seco de manera continua, lo cual representa una fuente potencial de materia prima que actualmente se encuentra subutilizada o descartada.

Durante la entrevista se relevaron aspectos fundamentales para la etapa de diseño, entre los que se destacan:

- Origen y tipo de residuo disponible: aserrín seco proveniente de especies arbóreas regionales, producto de procesos industriales de corte, cepillado y moldurado.
-

- Volumen estimado de producción: aproximadamente 600 kg/h de *pellets*, de manera estable durante la jornada laboral.
- Condiciones del entorno de operación: disponibilidad de energía eléctrica trifásica en zona semiurbana, espacio físico moderado para la instalación del equipo, y entorno con baja disponibilidad de soporte técnico especializado.
- Usuarios potenciales: personal técnico de la cooperativa, operarios del aserradero, y productores interesados en soluciones energéticas sostenibles.
- Requisitos de diseño identificados: alta capacidad de producción, estructura robusta, facilidad de operación, mantenimiento simple, y un costo de fabricación razonable compatible con los recursos disponibles de la cooperativa.

A partir de esta información se establecieron los requerimientos preliminares que guiaron el proceso de diseño. Entre ellos, se priorizó una capacidad de procesamiento mínima de 600 kg/h, resistencia estructural adecuada para operación continua, y la posibilidad de fabricar el equipo empleando componentes disponibles a nivel local.

Aunque la recolección de información se limitó a una única entrevista, el perfil profesional del entrevistado, junto con su experiencia en entornos productivos rurales y su vinculación directa con actores estratégicos (cooperativa y aserradero), aportaron una base sólida y contextualizada para la formulación de los lineamientos funcionales y técnicos del proyecto.

4.1.2. Declaración de Misión

En base al análisis realizado en el apartado anterior, a continuación, se establece la Declaración de Misión del proyecto, cuyos considerandos guiarán la ejecución del proceso de diseño y fabricación de la máquina peletizadora de aserrín.

Título del Proyecto:

- Diseño y Fabricación de una Máquina Peletizadora de Aserrín
-

Descripción del Proyecto:

- El proyecto consiste en el diseño y construcción de un sistema electromecánico capaz de transformar aserrín seco, proveniente de procesos de aserrado, en *pellets* cilíndricos utilizados como biocombustible sólido.
- El objetivo es brindar una solución tecnológica funcional y de bajo costo, adecuada para su implementación en contextos productivos de pequeña y mediana escala, particularmente en cooperativas y aserraderos que generan residuos lignocelulósicos sin aprovechamiento energético.

Propuesta de Valor del Proyecto:

- Valorizar residuos de madera mediante su conversión en un producto energético útil y comercializable.
- Promover el uso de energías renovables en entornos rurales y semiurbanos.
- Fomentar el desarrollo tecnológico local mediante el diseño de un equipo robusto, replicable y de fácil mantenimiento.
- Aportar una herramienta de formación técnica y transferencia de conocimiento aplicable a otros contextos productivos.

Demandante:

- Profesional técnico agropecuario en colaboración con una cooperativa de trabajo y un aserradero regional.

Suposiciones y Restricciones:

- El equipo será accionado por un motor eléctrico trifásico.
 - Los componentes deberán ser estándar y disponibles en el mercado nacional.
 - La fabricación de piezas *ad-hoc* se realizará en talleres metalmecánicos locales.
 - Se contempla una capacidad mínima de procesamiento de 600 kg/h de aserrín seco.
-

- El diseño debe ser robusto y de fácil operación, considerando usuarios con formación técnica básica.

Involucrados:

Por lo expuesto, se identifican los siguientes actores involucrados en el proyecto:

- Profesional técnico agropecuario (impulsor de la iniciativa).
- Cooperativa de trabajo interesada en la implementación del sistema.
- Personal del aserradero proveedor de la materia prima.
- Estudiantes y docentes universitarios involucrados en el desarrollo técnico del proyecto.

4.1.3. Benchmarking

El *Benchmarking* es el análisis de productos existentes que cumplen con las mismas funciones que el diseño a realizar. Dentro de la Clarificación de la Tarea, es de utilidad para definir cuáles son las especificaciones que tienen las máquinas bajo estudio y de esta manera realizar un análisis de la correlación que pueden tener las mismas. Por otra parte, en el contexto de generación de un concepto, el *benchmarking* puede revelar conceptos existentes que se han puesto en práctica para resolver un problema particular, así como información sobre puntos fuertes y débiles de la competencia. Esta búsqueda externa se constituye en un importante método para identificar conceptos solución ([Ulrich y Eppinger, 2015](#)).

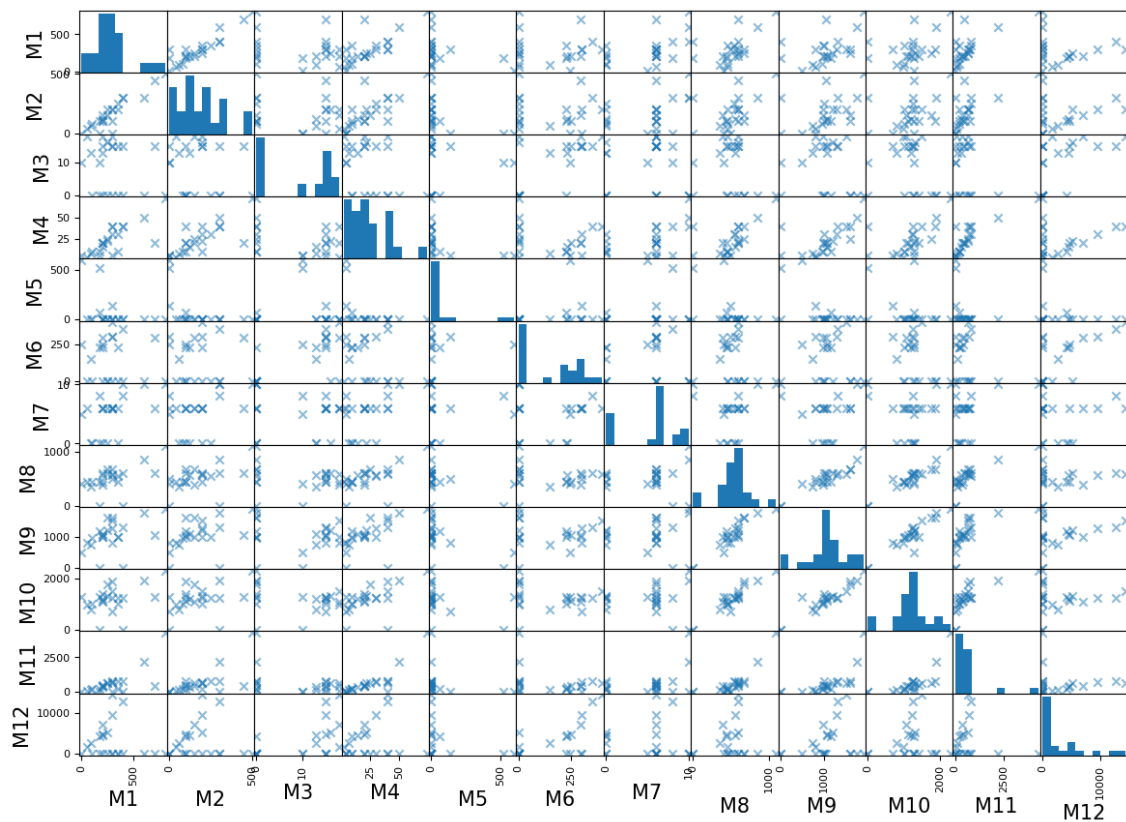
En este caso particular, se analizaron diversos productos disponibles en el mercado internacional (ver [Anexo I: Benchmarking](#)). Para realizar el estudio, en primer término se identificaron las métricas de interés en las especificaciones técnicas de las máquinas analizadas. En la [Tabla 2](#) se presentan las métricas contempladas en el análisis y sus unidades asociadas.

A partir de los datos obtenidos de las métricas relevadas, se realizó un análisis de dispersión y correlación entre los distintos parámetros técnicos considerados. El objetivo fue identificar posibles relaciones entre las variables y comprender cómo interactúan entre

Tabla 2. Parámetros analizados en el *benchmarking*.

ID	Métrica	Unidad
M1	Capacidad de producción máxima	kg/h
M2	Capacidad de producción mínima	kg/h
M3	Porcentaje de humedad	%
M4	Potencia	HP
M5	Velocidad de giro	rpm
M6	Diámetro de la matriz	mm
M7	Diámetro de los orificios de la matriz	mm
M8	Ancho	mm
M9	Largo	mm
M10	Alto	mm
M11	Peso	kg
M12	Costo de referencia	USD

sí en el contexto del diseño y selección de máquinas peletizadoras. Los resultados de este estudio se presentan mediante las matrices de dispersión y correlación mostradas en las Figuras 8 y 9, respectivamente.

Figura 8. Análisis de *benchmarking* - Matriz de Dispersión.

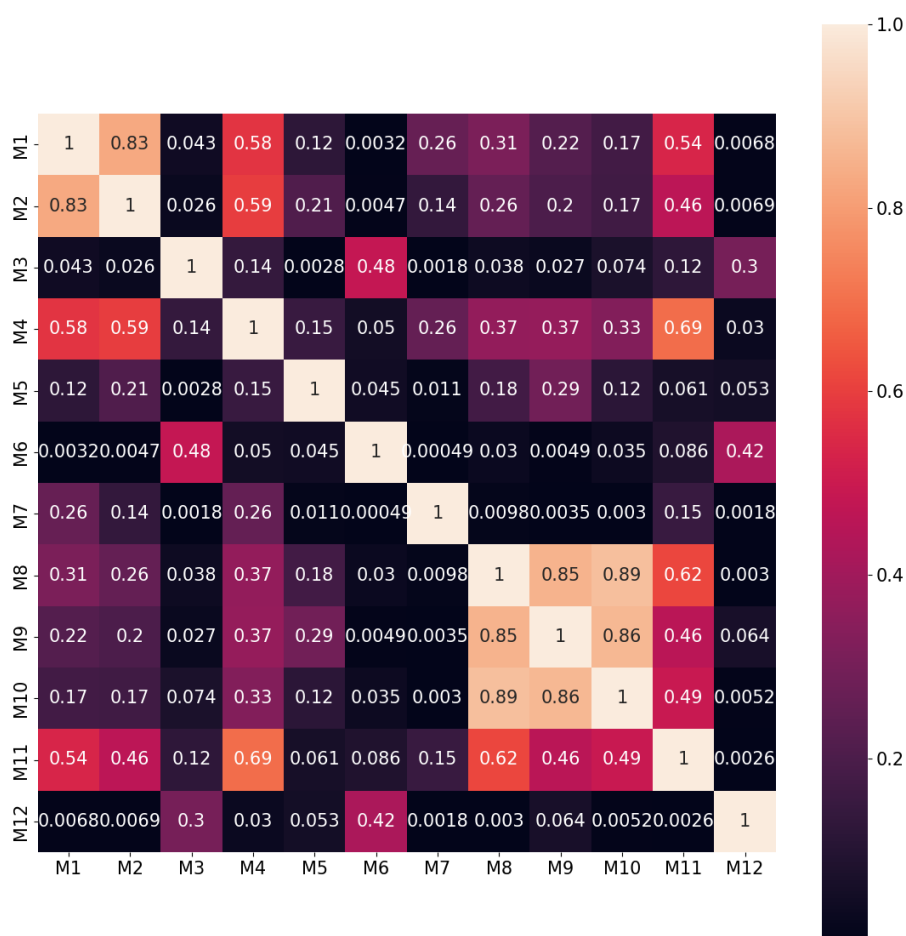


Figura 9. Análisis de *benchmarking* - Matriz de Correlación.

En particular, la matriz de correlación permite identificar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre pares de variables. En este análisis de benchmarking, se considera que un coeficiente de correlación mayor a 0,5 indica una relación positiva moderada a fuerte, lo cual sugiere que ambas variables están midiendo aspectos similares o relacionados de una misma característica. Por el contrario, si dos variables presentan una correlación baja o nula, esto podría indicar que están capturando dimensiones distintas, reflejan comportamientos independientes, o bien que alguna de ellas está mal definida o presenta una alta variabilidad no explicada, lo que dificulta su interpretación y uso comparativo.

Del análisis de las matrices obtenidas se destaca lo siguiente:

- Existe una fuerte correlación positiva entre la capacidad de producción (M1, M2) y la potencia instalada (M4), lo cual era esperable dado que ambas métricas reflejan la escala operativa del equipo.

- Se observaron altos niveles de correlación entre las dimensiones físicas —ancho (M8), largo (M9) y alto (M10)—, indicando una tendencia consistente en los formatos constructivos adoptados por los fabricantes.
- Otro hallazgo relevante es la elevada correlación entre las dimensiones externas y el peso (M11), lo que refuerza la idea de una estructura proporcional en términos de volumen y masa.
- Por el contrario, se registraron bajas correlaciones entre la mayoría de las variables geométricas y el diámetro de la matriz (M6), así como entre el porcentaje de humedad admitido (M3) y otros parámetros, lo que sugiere que estos aspectos dependen de particularidades de diseño más específicas.
- Por último, el costo de referencia (M12) mostró correlaciones moderadas con la potencia, el peso y el tamaño general del equipo, lo cual podría indicar que el precio se vincula más con la robustez que con una única métrica funcional.

4.1.4. Especificaciones Técnicas

En este apartado se presentan los requerimientos que provee el Comitente con el objetivo de fijar las limitaciones que tendrá el espacio de soluciones posibles. En general, se asocian estos requerimientos a especificaciones de rendimiento de la máquina, permitiendo tener suficiente libertad para evaluar distintas alternativas de diseño. Se debe tener en cuenta que la máquina será utilizada dentro de un establecimiento que cuenta con energía eléctrica trifásica. Además, se contempla que la máquina se utilizará de forma continua, en jornadas laborales de 12 y 18 horas diarias.

A su vez, se deben priorizar las características que faciliten el traslado de la máquina, su manejo, puesta a punto y mantenimiento. Además, se debe tener en cuenta que el uso de la misma será para producir únicamente *pellets* de madera, y no de diversas materias primas, como suelen ser este tipo de máquinas.

A partir de esta información, se definen en la Tabla 3 los requerimientos establecidos por el Comitente.

Tabla 3. Requerimientos del Comitente.

Requerimiento / Característica
Capacidad de producción (600 kg/h).
Uso continuo (12 a 18 horas por día).
Fuente de energía eléctrica, trifásica.
Modularidad que permita el traslado de la máquina en un vehículo utilitario.
Facilidad de conseguir repuestos, preferentemente comercializados en Argentina.
Fácil manejo, puesta a punto y mantenimiento.
Uso para la producción de <i>pellets</i> de madera.

A partir de estos requerimientos, del análisis de *Benchmarking*, de la normativa y del análisis y revisión de diversas fuentes bibliográficas, basadas en evidencia experimental, se definen en la Tabla 4 las especificaciones técnicas objetivo de la máquina.

Tabla 4. Especificaciones técnicas objetivo.

Métrica	Valor Ideal	Margen Aceptable
Capacidad de producción máxima [kg/h]	800	[700.0 – 1000.0]
Capacidad de producción mínima [kg/h]	600	[400.0 – 700.0]
Porcentaje de humedad [%]	13.0	[10.0 – 15.0]
Potencia [HP]	30.0	[20.0 – 35.0]
Diámetro de la matriz [mm]	187.5	[0.0 – 283.75]
Diámetro de los orificios de la matriz [mm]	6.0	[6.0 – 8.0]
Ancho [mm]	550.0	[440.0 – 600.0]
Largo [mm]	1050.0	[875.0 – 1290.0]
Alto [mm]	1250.0	[1000.0 – 1350.0]
Peso [kg]	400.0	[157.5 – 685.0]
Costo de referencia [USD]	10000	[5000-15000]

De la Tabla 4, las métricas de Capacidad de producción, Potencia y Diámetro de los orificios de la matriz provienen directamente de las especificaciones del Comitente. En contraste, el Diámetro de la matriz, el Ancho, Largo, Alto, Peso y Costo de referencia de la máquina se definieron a partir de los datos obtenidos del *Benchmarking*. Si bien el Porcentaje de humedad se ve influenciado por el análisis de máquinas existentes, su justificación principal se fundamenta en diversas fuentes bibliográficas basadas en evidencia experimental (Oberberger y Thek, 2010)(Araujo, 2019)(M. A. Ramos, 2019).

4.2. Diseño Conceptual

En esta etapa, se propusieron los principios de solución para la máquina en cuestión. Para esto, primero se estableció la estructura funcional. Luego, se realizó la búsqueda de los principios de solución apropiados para cada una de las funciones definidas. Y, finalmente, se combinaron los principios de funcionamiento por función para generar un principio de solución global de la máquina.

4.2.1. Análisis Funcional

Inicialmente, se presenta una caja negra que permite evaluar los flujos a la entrada y a la salida de la máquina. Luego, se muestra una caja transparente que profundiza en las funciones específicas que debe realizar la máquina (ver Figuras 10 y 11).

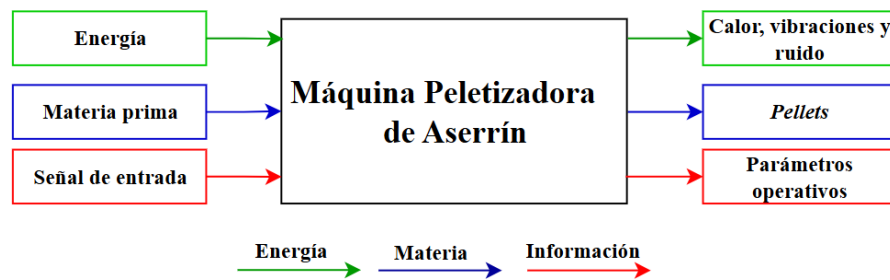


Figura 10. Caja negra.

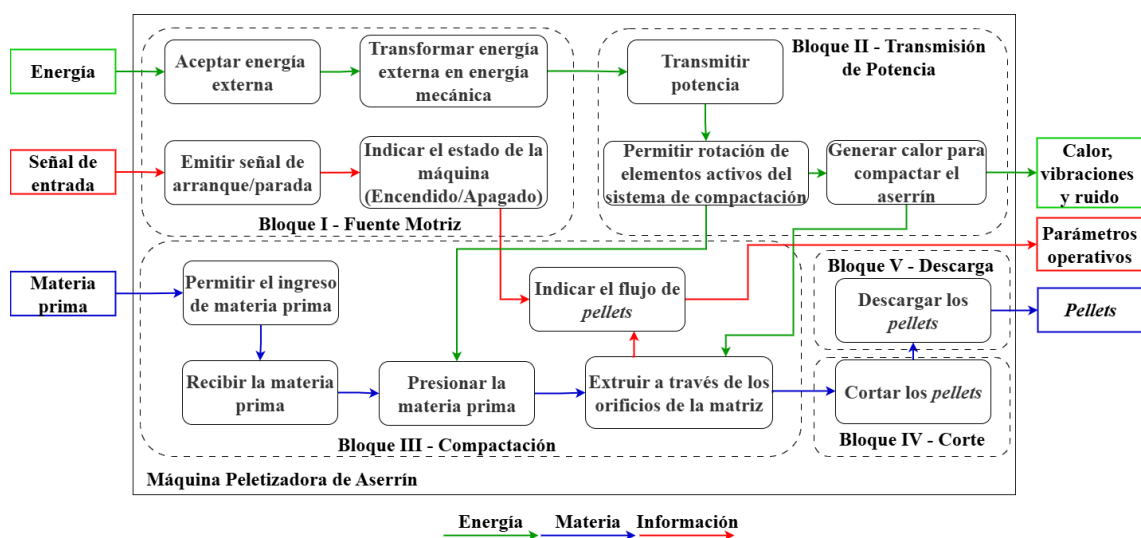


Figura 11. Caja transparente.

4.2.2. Análisis de Patentes

Como parte del relevamiento de soluciones tecnológicas existentes, se realizó una búsqueda sistemática de patentes utilizando la plataforma *Google Patents*. Esta estrategia permitió identificar una amplia variedad de desarrollos orientados a la compactación de biomasa lignocelulósica mediante extrusión a través de matrices perforadas.

Entre las innovaciones más frecuentes se encuentran mejoras en los sistemas de alimentación y dosificación del material, configuraciones optimizadas de rodillos y matrices, incorporación de mecanismos de calentamiento previo o por fricción, y estructuras modulares que facilitan el mantenimiento. También, se detectaron desarrollos enfocados en la calibración de los equipos y en la integración de etapas complementarias como el secado o la clasificación de partículas. Se presentan a continuación las patentes analizadas junto con la información relevante extraída (ver Tablas 5 y 6).

Tabla 5. Resumen de Patentes sobre Máquinas Peletizadoras.

Patente	Título	Descripción
US2565830A	<i>Pelleting Machine</i>	Extrusión bajo presión con matriz perforada con disposición anular. Recuperador de partículas finas.
US3307501A	<i>Pellet Mill</i>	Diseño con matriz anular perforada. Giro de rodillos en un sentido y de la matriz en el sentido contrario. Es abastecida por un cilindro de mezclado.
US8944801B2	<i>Pellet Press for Producing Pellets</i>	Diseño con matriz giratoria de disco plana. Arquitectura modular.
US9452551B2	<i>Pelletizing Device with Complementary Rollers</i>	Diferentes configuraciones de rodillos para reducir el consumo de potencia en el proceso de peletizado.
US9453176B2	<i>Method for Making Biomass Pellets</i>	Describe el método mediante el cual se conforman los <i>pellets</i> de biomasa. Incluye diversas materias primas.
US4770621A	<i>Pellet Mill</i>	Peletizadora con alimentador y mezclador incluido. Matriz anular con rodillos de presión ajustable.

Tabla 6. Resumen de Patentes sobre Máquinas Peletizadoras (cont.)

Patente	Título	Descripción
US2782736A	<i>Machine for Forming Feed Pellets</i>	Contiene un dispositivo agitador de la materia prima en la sección de compactación. Estructura modular que permite el desmontaje del agitador y los rodillos fácilmente.
US20190210315A1	<i>Pellet Mill with Addition of Fluid</i>	Muestra un dispositivo que adiciona fluidos entre la matriz y los rodillos (Para matrices de disco planas y anulares) permitiendo controlar la temperatura de la matriz y reduciendo el consumo de potencia.
EP2478954B1	<i>Pelletizing Device</i>	Peletizadora con matriz anular y rodillos. Dispone de un sistema de cojinetes lubricado con aceite.
US20060037236A1	<i>Method for Making Wood Pellets</i>	Utiliza un dispositivo calentador de una mezcla de aserrín, lubricante y aceite de madera que luego es peletizada.
CA390725	<i>Feed Pellet Compressing Machine</i>	Matriz anular con doble inclinación de 45 grados, acople con rodillos en forma de "V".
US2157528	<i>Machine for forming compressed feeds and similar products</i>	Peletizadora de matriz anular con un sistema de evacuación vertical con forma de tolva.
US3841817A	<i>Pelletizing Apparatus</i>	Contiene una cámara de mezclado que permite acondicionar la materia prima y alimentarla continuamente. Matriz anular con rodillos giratorios.
US4297091A	<i>Alfalfa Pelletizing Apparatus</i>	Se alimenta la materia prima mediante una tolva sobre una cinta que tiene agujeros y funciona como matriz.
US5306131	<i>Pelletizing Roll</i>	Contiene dos rodillos acoplados mediante ruedas dentadas vinculadas a un tercer engranaje propulsado por un motor. Uno de los rodillos contiene los agujeros y funciona como matriz. Dentro de este mismo se inserta una cuchilla que corta los <i>pellets</i> en la longitud deseada.

4.2.3. Generación de Conceptos

Con el fin de generar una gran variedad de soluciones alternativas de diseño para la máquina bajo estudio, en función de las características y funciones que se han definido anteriormente, se buscarán los medios por los cuales estas podrán realizarse, siendo formas físicas o componentes reales. Luego, se ubicarán las mismas en un diagrama que permita evaluar las combinaciones factibles entre las distintas soluciones planteadas.

Bloque I: Fuente Motriz.

La transformación de la energía externa (eléctrica) en mecánica se realizará mediante un motor eléctrico trifásico.

Bloque II: Transmisión de potencia.

Entre las funciones requeridas, se encuentra la transmisión de potencia desde la fuente motriz a la máquina y la reducción de velocidad. Esta última es muy importante teniendo en cuenta que el rozamiento entre las partes que conforman el *pellet* genera el calor necesario para que este se compacte y obtenga unas propiedades mecánicas aceptables. Además, la velocidad de giro de los elementos activos de compactación es uno de los principales parámetros que influyen en la capacidad de producción de la máquina. Para abordar estas funciones, se consideran las siguientes soluciones de transmisión.

- Transmisión por poleas y correas: Esta solución ofrece como principal ventaja su facilidad de mantenimiento y bajo costo. Sin embargo, su implementación exige un conocimiento preciso de parámetros de montaje, como la fuerza de pretensado, para asegurar una eficiencia adecuada en operación. Además, para reducciones de velocidad elevadas, la diferencia de diámetros entre poleas puede resultar impráctica. Cabe destacar que la vida útil de las correas es considerablemente menor en comparación con otras alternativas de transmisión.
 - Transmisión por engranajes rectos: Este tipo de vinculación se caracteriza por una prolongada vida útil y una elevada eficiencia en la transmisión de potencia. Además, es posible adquirir reductores estándar en el mercado que cumplan con las
-

relaciones de velocidad deseadas. Como desventaja, sus costos iniciales y de mantenimiento son considerablemente superiores a los asociados a una transmisión por poleas y correas. Adicionalmente, la fabricación y el reemplazo de piezas defectuosas son procesos de mayor complejidad. Otro inconveniente notable es su operación más ruidosa.

- Transmisión sin fin-corona: Esta transmisión comparte ventajas y desventajas con los engranajes rectos, pero se distingue por permitir una mayor reducción de velocidad debido a la configuración de sus engranajes. Adicionalmente, el contacto más suave entre los dientes resulta en una reducción significativa de ruido y calor en comparación con las transmisiones de engranajes rectos.
- Transmisión por cadenas: Este sistema ofrece una mayor eficiencia en la transmisión de potencia en comparación con las poleas y correas, aunque comparte algunas características. El mantenimiento de las cadenas es más exigente que el de las correas, principalmente debido a la necesidad de lubricación y limpieza. No obstante, una ventaja significativa es que no requieren fuerza de tensado, ya que la transmisión de potencia se logra mediante un cierre geométrico de las cadenas con los dientes de los piñones, lo que beneficia las solicitaciones sobre el eje. Por otro lado, los niveles de ruido pueden ser superiores a los de otras alternativas de transmisión.

Bloque III: Compactación (conformado de *pellets*).

Para conformar el producto final, la materia prima debe ser prensada contra una matriz que posee orificios con la forma deseada de los *pellets*, a través de los cuales el material compactado es extruido. Este proceso puede llevarse a cabo mediante diversas configuraciones, como se detalla a continuación.

- Matriz plana con rodillos: La materia prima es alimentada verticalmente, donde es comprimida por los rodillos y limitada a pasar por los orificios de la matriz plana en sentido vertical, para luego ser fraccionada por el sistema de corte. Dependiendo de la cantidad de agujeros de la matriz, del tamaño de los rodillos y de la velocidad de giro de estos últimos, esta disposición puede lograr una producción de entre 5 a
-

1000 kg/h de *pellets* (Oberberger y Thek, 2010). Existen dos funcionamientos alternativos para este diseño, la matriz puede ser quien esté vinculada al eje principal girando a la velocidad establecida, o bien pueden cumplir esta función los rodillos. En la Figura 12 se presenta esta disposición, en la cual el flujo de materia prima está representado por las flechas negras.

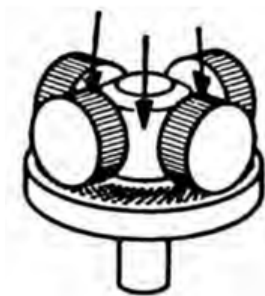


Figura 12. Matriz plana con rodillos (Oberberger y Thek, 2010).

- Matriz anular con rodillos: Este tipo de matriz tiene una alimentación de materia prima vertical y da lugar a la formación de los *pellets* mediante la compactación con rodillos, que luego son expulsados de forma horizontal. Es una disposición que permite producir una mayor cantidad de *pellets* por hora que la matriz plana. Sin embargo, su costo y complejidad de diseño es mayor, ya que suele contar con engranajes planetarios para transmitir el movimiento a los rodillos, además de que su maniobrabilidad es menor, lo que dificulta el mantenimiento y puesta a punto de la máquina (ver Figura 13).



Figura 13. Matriz anular con rodillos (Oberberger y Thek, 2010).

- Matriz de banda plana y rodillo: El diseño en cuestión es raramente empleado en configuraciones existentes debido a su ineficacia en la compactación del material. La baja capacidad de producción se atribuye a la multiplicidad de etapas del proce-

so, lo cual también compromete la generación de calor necesaria para la consolidación de los *pellets*. Otra limitación importante es la restricción de la velocidad de avance de la banda (ver Figura 14).

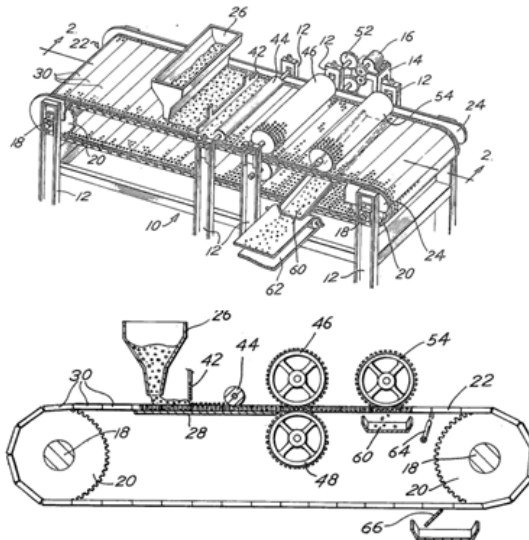


Figura 14. Matriz de banda con rodillos (Streffing, 1981).

- Matriz de rodillo doble: En esta configuración la compactación del material se logra con dos rodillos acoplados mediante engranajes, siendo uno de ellos el que posee los orificios calibrados para conformar los *pellets*. Esta vinculación contribuye a una mayor complejidad del sistema. A pesar de su alta tasa de producción, la extracción de los *pellets* de la matriz puede presentar dificultades debido a la disposición de esta. Por estas razones, no es una configuración muy común en el mercado (ver Figura 15).

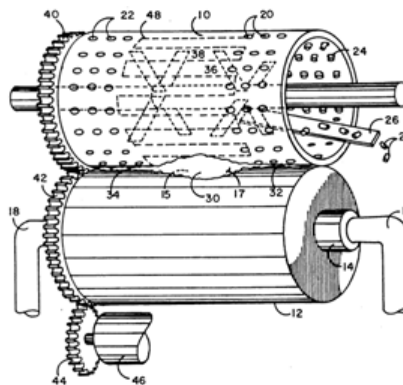


Figura 15. Matriz de rodillo doble (Brotz, 1994).

Bloque IV: Corte de *pellets*.

Una vez que se conforma el *pellet* a través de la matriz es necesario realizar el corte de los mismos en la dimensión preestablecida. Para esto se pueden plantear distintas alternativas, las cuales se mencionan a continuación.

- Cuchillas de corte estacionarias: Se utiliza una cuchilla que no se desplaza en ningún sentido, por lo que el corte de los *pellets* se da al mover la matriz (ver Figura 16). El dispositivo puede incluir una arista afilada para mejorar la eficiencia del corte. Es importante destacar la necesidad de calibrar correctamente la separación entre la cuchilla y la matriz.

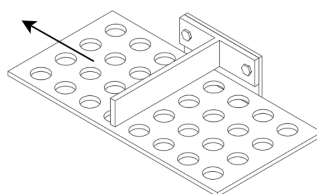


Figura 16. Cuchillas de corte estacionarias.

- Cuchilla regulable en altura: Este dispositivo, que puede ser móvil o fijo (dependiendo de su punto de anclaje), presenta la ventaja de poder ajustar la separación entre la cuchilla y la matriz para adaptarse el funcionamiento de la máquina. Esta regulación se da mediante un eje roscado al cual se debe tener fácil acceso (ver Figura 17).

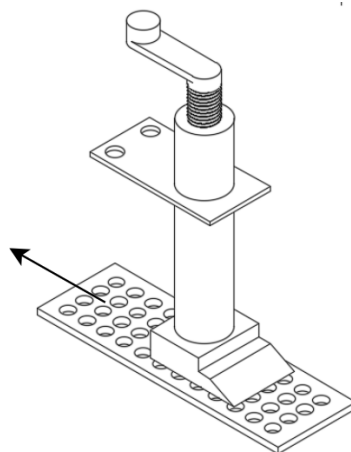


Figura 17. Cuchilla regulable en altura.

- Corte por hilo oscilante: Este dispositivo utiliza un hilo de acero como sustituto de las cuchillas, el cual opera con un movimiento lineal oscilatorio generado por un mecanismo de engranajes. Dicha oscilación resulta en un desgaste homogéneo y una prolongada vida útil del componente (ver Figura 18). Como contrapartida, esta configuración requiere un consumo de potencia adicional y presenta una mayor complejidad en su diseño frente a otras alternativas disponibles.

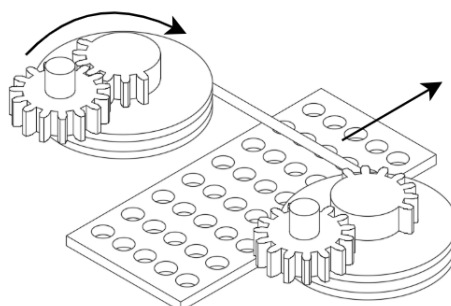


Figura 18. Corte por hilo oscilante.

- Cuchilla móvil: El principio de funcionamiento es idéntico al de las cuchillas fijas, con la única diferencia de que, en esta disposición, la matriz es el elemento estacionario y las cuchillas son las que se desplazan para cortar los *pellets* (ver Figura 19). Este sistema también implica un consumo de energía adicional que debe ser cuantificado. Puede incorporar una o múltiples cuchillas.

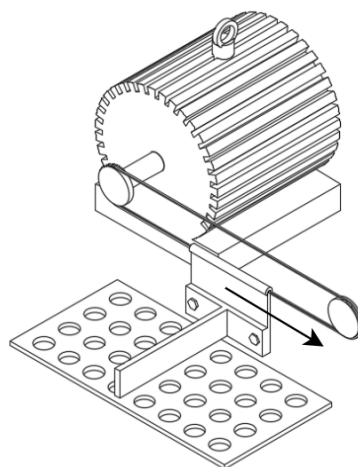


Figura 19. Cuchilla móvil.

Bloque V: Descarga de *pellets*.

Una vez que se cortan los *pellets* estos quedan atrapados en la carcasa de la máquina, dependiendo de la disposición que esta tenga. Por lo cual, es necesario tener un dispositivo que cumpla con la función de evacuar los *pellets*. Para satisfacer esto se plantean las siguientes soluciones.

- Plano inclinado: Este sistema no presenta un consumo de energía adicional y es altamente eficiente en un amplio rango de capacidad de producción (ver Figura 20). Se debe calcular el ángulo de evacuación para prevenir la acumulación indeseada de producto final en la máquina.

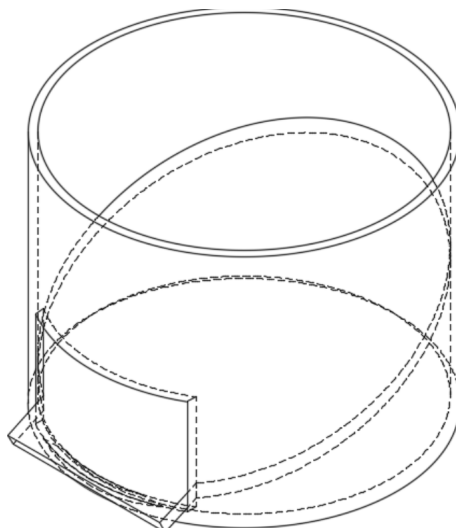


Figura 20. Plano inclinado.

- Cuchilla evacuadora: Este dispositivo incorpora una pared giratoria, por la cual los *pellets* producidos se deslizan hacia afuera gracias a la fuerza centrífuga (ver Figura 21). Puede configurarse como una extensión de las cuchillas de corte, lo que evitaría un consumo de energía adicional. Es una disposición altamente eficiente que prevendría los atascos durante la evacuación de los *pellets*.

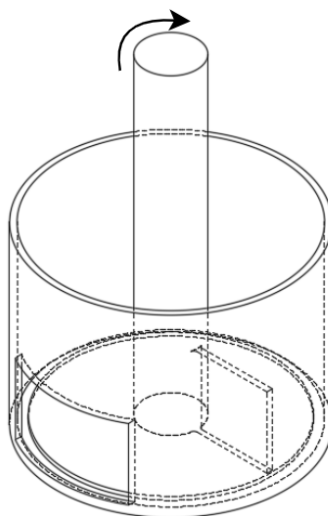


Figura 21. Cuchilla evacuadora.

- Cinta transportadora: Es una solución eficiente, con una alta tasa de evacuación y puede variarse la velocidad de la cinta dependiendo de la capacidad de producción que tenga la máquina (ver Figura 22). Sin embargo, introduce un consumo energético extra a la máquina, e implica una mayor complejidad en el diseño.

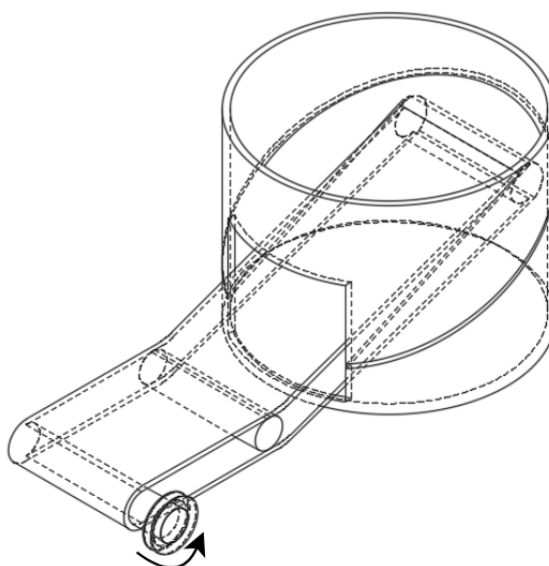


Figura 22. Cinta transportadora.

Con las soluciones propuestas para cada bloque funcional se elaborará una matriz de soluciones. Esto facilitará la combinación de las opciones para crear diversos conceptos solución para la máquina peletizadora de aserrín.

4.2.4. Matriz morfológica

A continuación, en la Figura 23, se presentan de forma ordenada y resumida las distintas opciones de solución para cada bloque funcional (las cuáles fueron presentadas anteriormente), con las posibles combinaciones que permiten obtener los conceptos solución para la máquina peletizadora de aserrín.

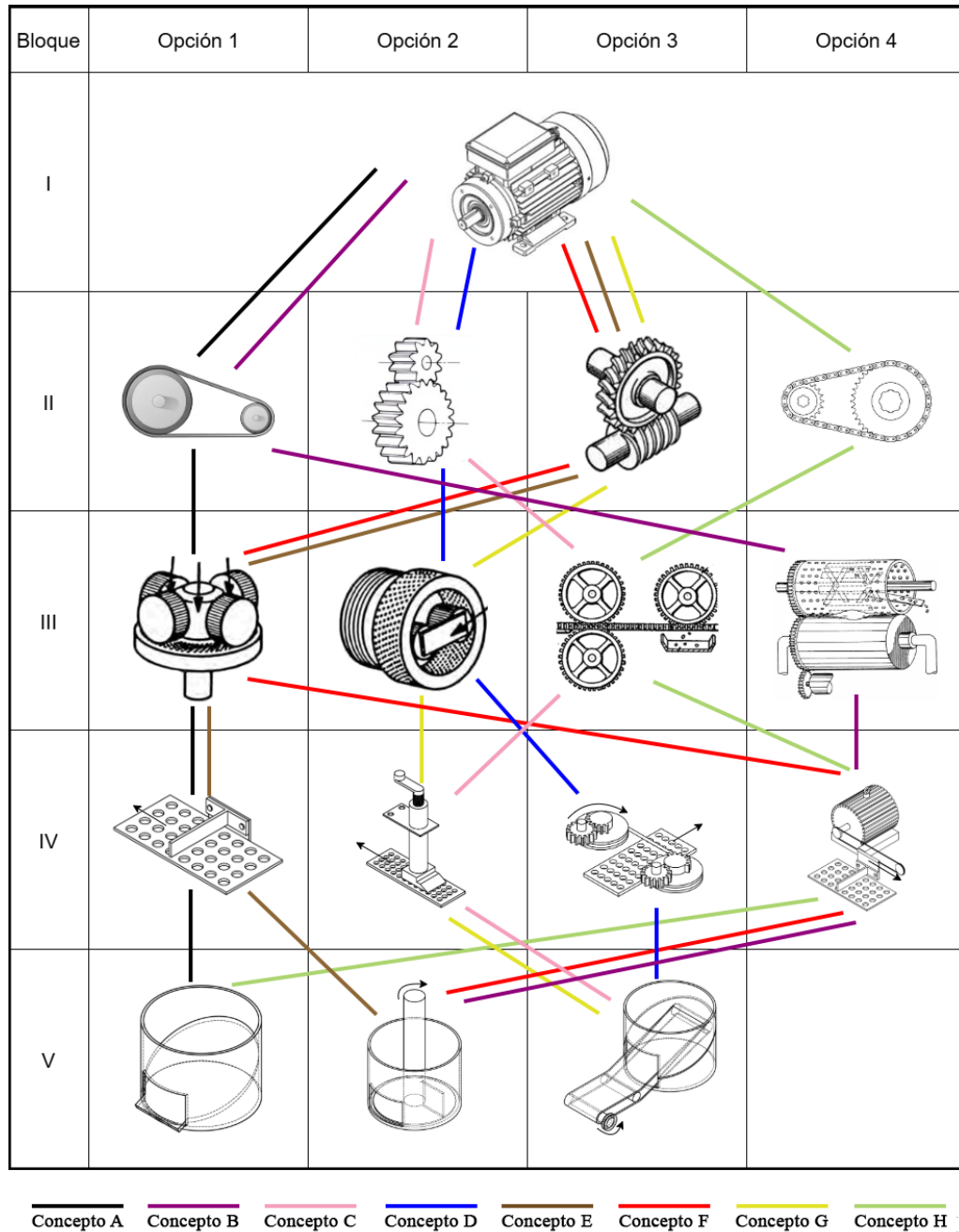


Figura 23. Matriz morfológica.

Se obtuvieron ocho conceptos solución, los cuáles se resumen en la Figura 24.

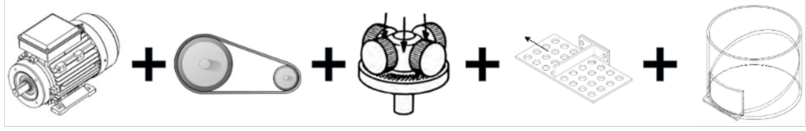
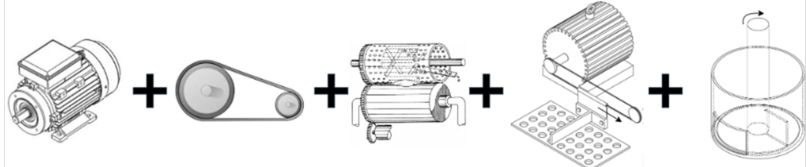
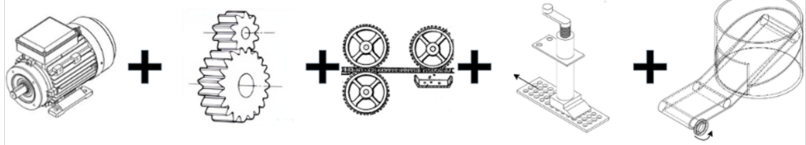
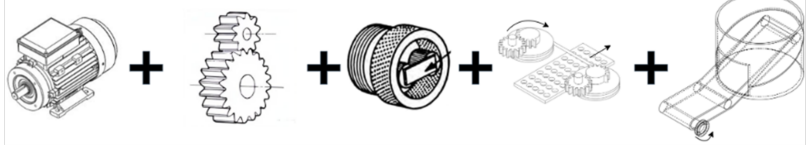
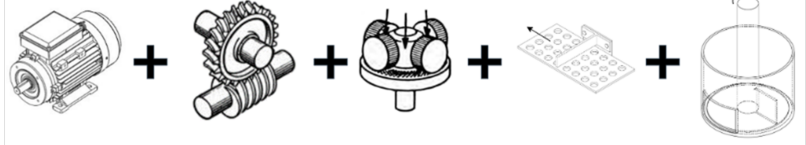
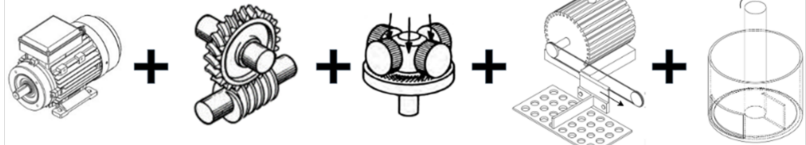
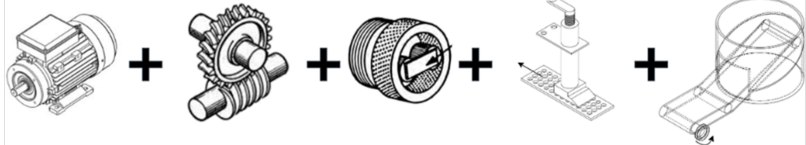
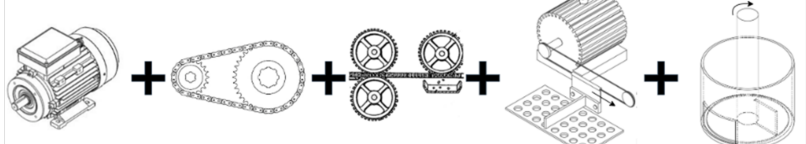
Concepto	Combinación
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	
H	

Figura 24. Resumen Conceptos Solución.

4.2.5. Selección del Concepto Solución

Se utilizará una metodología de dos etapas para la selección de los conceptos. La primera etapa es el filtrado de conceptos, donde se realiza una evaluación rápida y aproximada, con el objetivo de descartar o combinar los conceptos que no sean viables. La segunda etapa es la evaluación de conceptos, donde se realiza un análisis más cuidadoso de los conceptos que avanzan luego del filtrado, con el objetivo de seleccionar el concepto que mejor cumpla con los criterios establecidos.

Para comenzar el proceso de selección se deben establecer los criterios con los que se elegirá la alternativa de diseño que mejor se adapte a las necesidades del Comitente. Para cada uno de los conceptos solución que se enumeraron anteriormente, se tendrán en cuenta los siguientes criterios de evaluación.

- **Facilidad de fabricación y montaje:** Como se mencionó anteriormente, se aplicará la técnica *DfMA* en donde se busca reducir el número total de partes, maximizar el número de componentes estandarizados y minimizar la complejidad de fabricación de las partes *ad-hoc*. Por otra parte, se debe minimizar la cantidad de operaciones para la puesta en marcha y la cantidad de piezas que se deben montar o desmontar para realizar mantenimiento.
 - **Facilidad de uso y mantenimiento:** Estos dos aspectos están directamente relacionados con la facilidad de fabricación y montaje. Para obtener la facilidad de uso y mantenimiento es fundamental minimizar la cantidad de operaciones requeridas para la puesta en marcha y reducir el número de piezas que deben montarse o desmontarse para el mantenimiento.
 - **Capacidad de producción:** Se busca cumplir los requerimientos objetivo establecidos anteriormente, por lo que se evaluará la alternativa que mejor satisfaga una capacidad de producción entre 600 - 800 kg/h.
 - **Eficiencia de la transmisión:** Se busca aprovechar la capacidad de la fuente de energía al máximo posible, por lo tanto, la transmisión de potencia debe tener el menor porcentaje de pérdidas posible.
-

- **Costo:** En la medida de lo posible se buscará minimizar los costos en todo aspecto, fomentando la utilización de material y componentes disponibles.
- **Ruido:** Este parámetro es importante para lograr un ambiente de trabajo en condiciones satisfactorias. Además, el ruido suele ser proveniente de vibraciones que pueden afectar a la máquina completa, por lo que se buscará minimizarlo en todo aspecto.

A continuación se presenta el filtrado de conceptos.

Tabla 7. Matriz de Evaluación de Conceptos

Criterios	Conceptos							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Facilidad de fabricación y montaje	+	-	0	0	+	+	0	+
Facilidad de uso y mantenimiento	-	-	+	0	-	+	0	+
Capacidad de producción	-	-	0	0	-	-	0	+
Eficiencia de la transmisión	-	-	0	0	0	0	0	-
Costo	+	+	0	+	0	+	0	+
Ruido	-	-	-	-	0	0	0	-
Suma +	2	1	1	1	1	3	0	3
Suma 0	0	0	4	4	3	2	6	0
Suma -	4	5	2	1	2	1	0	3
Evaluación neta	-2	-4	0	0	-1	2	0	0
Lugar	4	5	2	2	3	1	2	2
¿Continuar?	No	No	Si	Si	No	Si	Si	Si

Inicialmente, el Concepto Solución A tiene menor facilidad de uso y mantenimiento que el Concepto G (Referencia) debido a que la implementación de cuchillas estacionarias impondría un diseño con matriz rotante. Las matrices rotantes, sin embargo, son más adecuadas para materiales blandos, comúnmente en el sector alimentario o para biomásas de baja dureza. Para la peletización de materia prima de madera, es recomendable emplear una matriz fija con rodillos rotantes, ya que esta configuración permite ejercer una mayor fuerza de compactación (M. A. Ramos, 2019). Este principio de funcionamiento aplica de igual manera al Concepto E. Adicionalmente, y al igual que el Concepto Solución B,

el Concepto A tiene una menor eficiencia de la transmisión al incluir una transmisión por poleas y correas, la cual resulta impráctica para grandes reducciones de velocidad, implicando diferencias significativas en los diámetros de las poleas. En base a los motivos enunciados es que se decide no continuar con los Conceptos A, B y E.

Para relizar la evaluación de conceptos, una vez definidos los criterios es necesario darle una importancia relativa, para luego calcular y comparar los valores de utilidad relativa que tenga cada alternativa de diseño.

Con el fin de determinar la importancia relativa de cada criterio se presenta la Tabla 8. Aquellos criterios que se consideren más relevantes que otros tendrán una puntuación de 1, para igual importancia 0.5 y para menor importancia 0. Los criterios analizados se identifican a continuación:

- Criterio I: Facilidad de fabricación y montaje.
- Criterio II: Facilidad de uso y mantenimiento.
- Criterio III: Capacidad de producción.
- Criterio IV: Eficiencia de la transmisión.
- Criterio V: Costo.
- Criterio VI: Ruido.

A partir de la puntuación obtenida de cada criterio se establece el porcentaje de peso relativo de cada criterio.

Tabla 8. Determinación de la importancia de los criterios.

Criterios	I	II	III	IV	V	VI	Total	Peso relativo
I	-	1	0.5	1	1	1	4.5	30 %
II	0	-	0.5	0.5	1	1	3	20 %
III	0.5	0.5	-	1	1	1	4	27 %
IV	0	0.5	0	-	1	1	2.5	17 %
V	0	0	0	0	-	0.5	0.5	3 %
VI	0	0	0	0	0.5	-	0.5	3 %
							15	100 %

Utilizando los Conceptos Solución considerados factibles, tras el filtrado previo, se realizará una evaluación detallada de cada uno. En este proceso, cada criterio se puntuará en una escala del 1 al 10 y este valor se ajustará mediante su coeficiente de ponderación. El concepto con el puntaje ponderado total más elevado será el elegido.

Tabla 9. Matriz de Evaluación.

		Concepto									
		C		D		F		G		H	
Criterios de selección	Peso	Calif.	Ev. pond.	Calif.	Ev. pond.	Calif.	Ev. pond.	Calif.	Ev. pond.	Calif.	Ev. pond.
I	30 %	2	0.6	1	0.3	5	1.5	3	0.9	3	0.9
II	20 %	2	0.4	1	0.2	4	0.8	2	0.4	3	0.6
III	27 %	2	0.54	4	1.08	3	0.81	4	1.08	2	0.54
IV	17 %	3	0.51	3	0.51	4	0.68	4	0.68		0.17
V	3 %	3	0.09	2	0.06	4	0.12	3	0.09	4	0.12
VI	3 %	3	0.09	3	0.09	4	0.12	4	0.12	1	0.03
Total puntos			2.23		2.24		4.03		3.27		2.36
Lugar			5		4		1		2		3
¿Continuar?		No		No		Desarrollar		No		No	

Tras una evaluación rigurosa, basada en los criterios preestablecidos, se ha determinado que el Concepto Solución F exhibe el mayor porcentaje de adaptación a los requisitos y objetivos del proyecto. Este resultado consolida al Concepto F como la alternativa más prometedora, demostrando su superioridad en la integración de las funciones y el cumplimiento de las especificaciones técnicas definidas.

4.2.6. Arquitectura de la Máquina

En la Figura 25, se presenta la primer aproximación a la arquitectura de la máquina en función del concepto seleccionado, con el objetivo de comunicar y representar gráficamente los componentes principales y su disposición. Luego, se muestra una vista en explosión del concepto solución ganador, junto con un listado de los componentes principales, ver Figura 26.

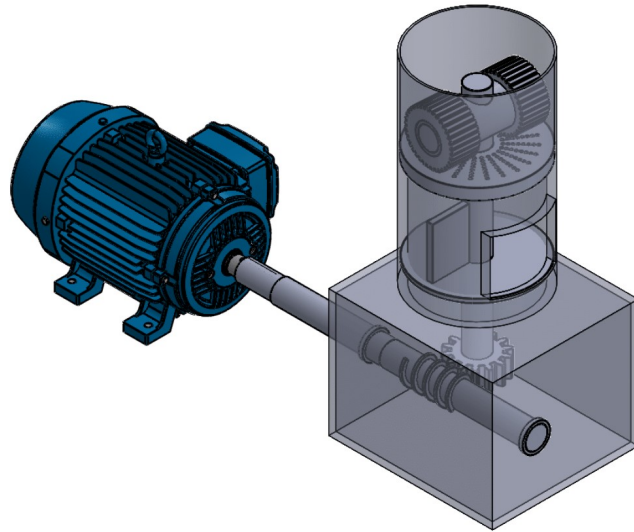


Figura 25. Arquitectura del concepto solución seleccionado.

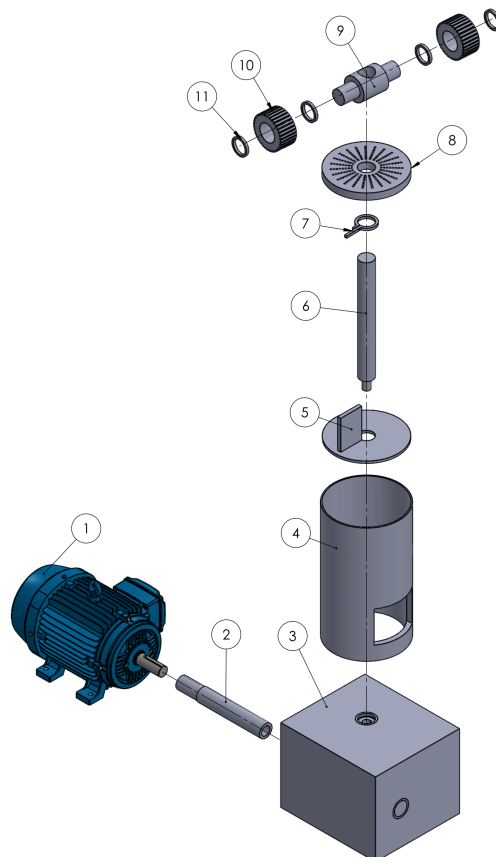


Figura 26. Perspectiva explotada del concepto solución.

Referencias: (1) Motor Eléctrico, (2) Eje Motor, (3) Caja Reductora, (4) Carcasa Central, (5) Cuchillas de Descarga, (6) Eje Principal, (7) Cuchillas de Corte, (8) Matriz, (9) Eje de Rodillos, (10) Rodillos, y (11) Rodamientos.

Una vez definido el concepto de la máquina y establecida su arquitectura funcional preliminar, se avanzó hacia el desarrollo de un prototipo físico integral, concebido para validar los principios de funcionamiento, evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación y generar datos experimentales que sirvieran para optimizar el diseño.

En consecuencia, las secciones subsiguientes —Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle, Fabricación y Montaje y Pruebas Experimentales— describen de manera ordenada el proceso completo de diseño, construcción y evaluación del prototipo, considerado una herramienta clave para reducir la incertidumbre técnica y sentar las bases del diseño definitivo de la máquina.

4.3. Ingeniería Básica

Durante esta etapa se abordaron el dimensionamiento inicial y la definición de los principales componentes del prototipo, siguiendo el enfoque propuesto por [Ulrich y Eppinger \(2015\)](#), quienes describen los prototipos como aproximaciones de una máquina en una o más dimensiones de interés. Esta metodología fue seleccionada debido a la necesidad de validar el comportamiento global del sistema y analizar su sensibilidad frente a variaciones en las variables operativas.

El desarrollo se estructuró a partir de las especificaciones técnicas del motor eléctrico provisto por el Comitente. Para el predimensionamiento se adaptó la metodología de diseño de [Guerra Ludeña \(2013\)](#) y [Semenov et al. \(2019\)](#), considerando tanto las propiedades de la biomasa como las restricciones impuestas por el motor trifásico disponible. A diferencia del enfoque convencional —en el cual la capacidad de producción determina la potencia requerida— aquí se aplicó un procedimiento iterativo inverso: partiendo de la potencia disponible se definieron las dimensiones preliminares de matriz, rodillos y ejes (ver Figura 27).

El motor seleccionado, reacondicionado y puesto en marcha, presenta 20 CV (15 kW) de potencia nominal y 1450 rpm de velocidad de giro. Considerando las pérdidas del sistema, se adoptó una potencia útil de 9 kW como valor de diseño. Este parámetro, junto con el diámetro de *pellets* de 6 mm especificado por el Comitente y un coeficiente de fricción biomasa–matriz de $\mu = 0,8$, permitió dimensionar los componentes principales.

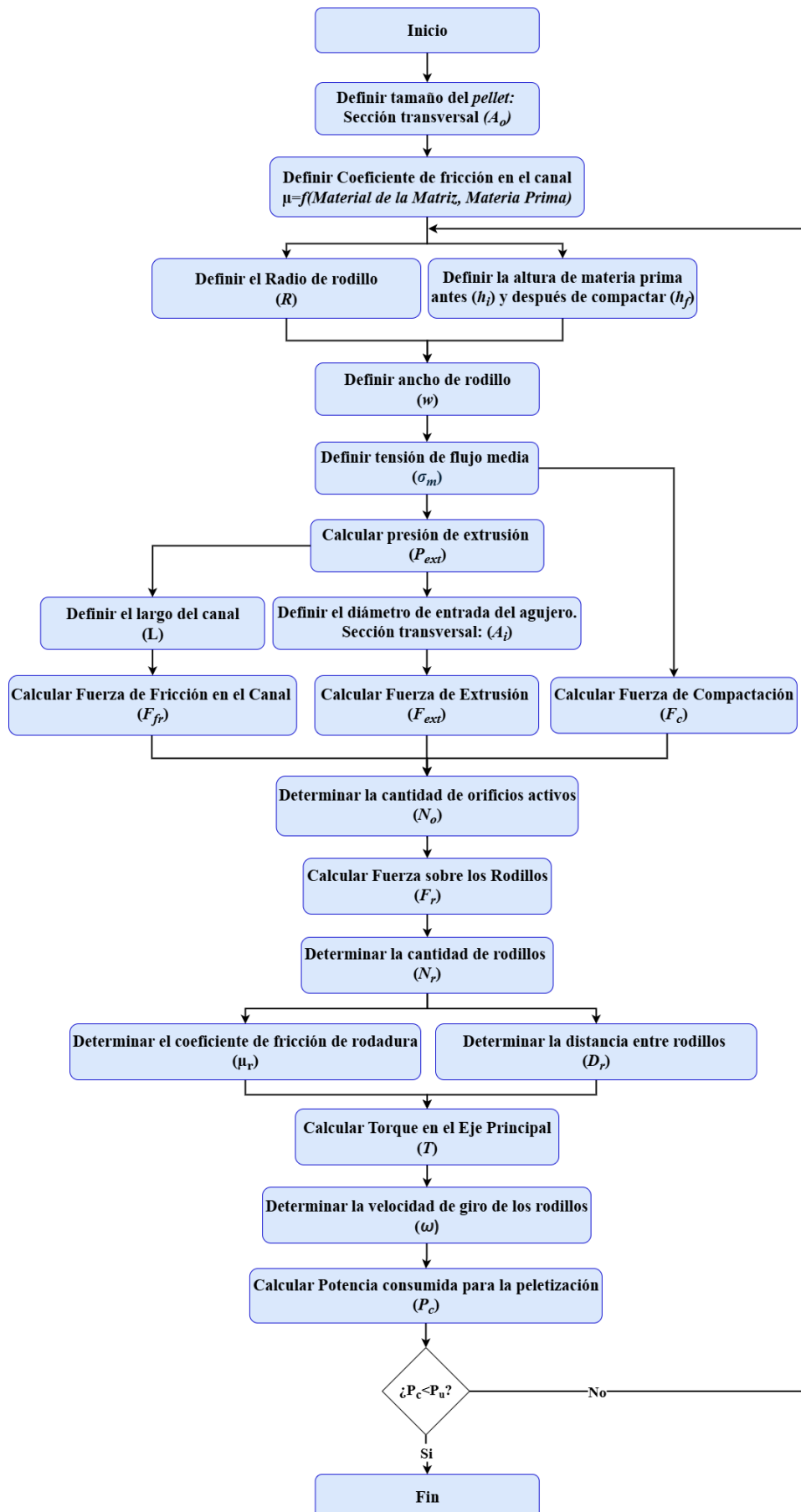


Figura 27. Diagrama de flujo para el predimensionamiento del prototipo.

En el Anexo B se presenta el detalle completo del proceso iterativo de cálculo y la justificación de los valores adoptados. A continuación, se resumen los resultados más relevantes acompañados de las figuras de cada componente.

- **Rodillos de compactación:** fabricados en acero AISI-SAE 8620 por su resistencia al desgaste y facilidad de mecanizado. Su geometría fue diseñada para simplificar las operaciones de torneado y fresado de ranuras (Figura 28).

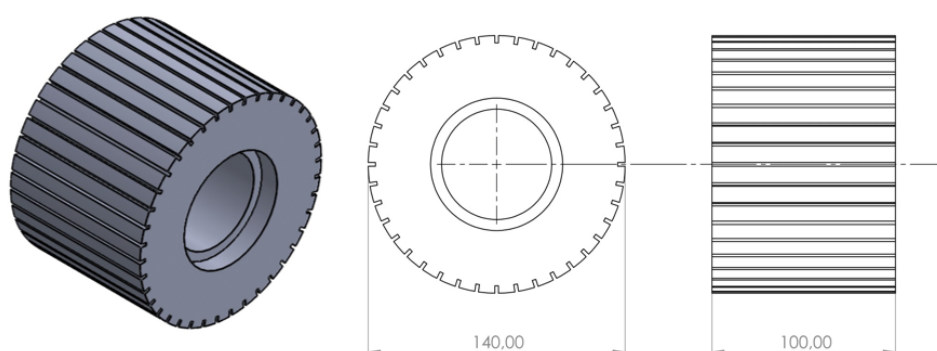


Figura 28. Rodillo de compactación.

- **Matriz de compactación:** disco de acero AISI-SAE 8620 con 300 orificios de 6 mm distribuidos en patrón regular, garantizando la capacidad de producción requerida (Figura 29).

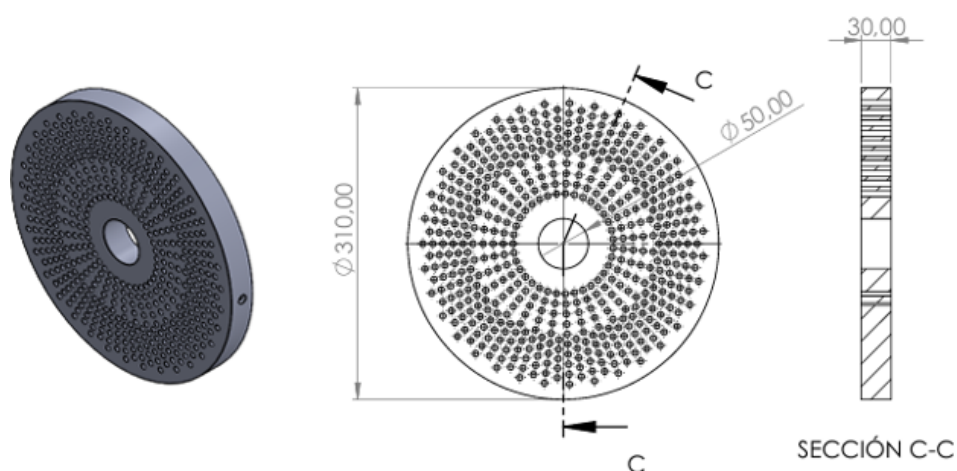


Figura 29. Matriz de compactación.

- **Eje principal:** transmite la potencia del sistema. Diseñado con cambios de sección para el alojamiento de rodamientos radiales y axiales, y acople con el eje secundario (Figura 30).

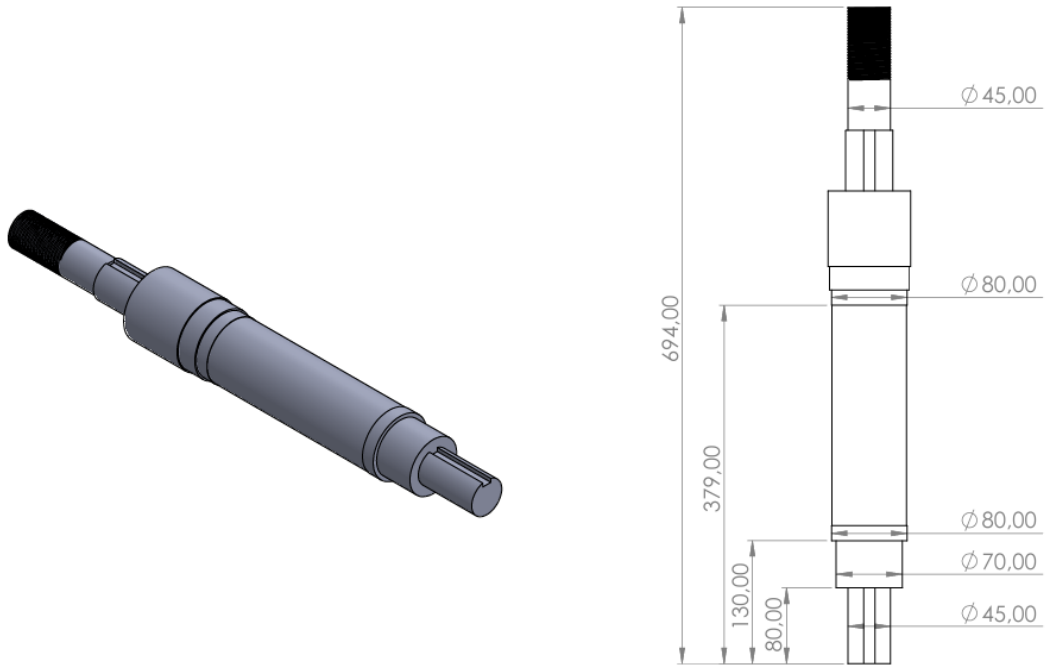


Figura 30. Eje principal.

- **Eje secundario:** dimensionado con diámetro mínimo de 50 mm y cambios de sección que limitan el movimiento de los rodillos, asegurando su montaje (Figura 31).

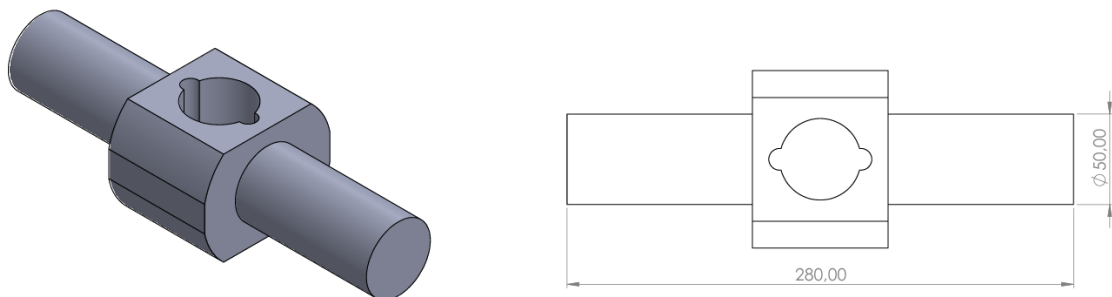


Figura 31. Eje secundario.

- **Sistema de corte y evacuación:** cuchillas de acero de 10 mm, acopladas solidariamente al eje principal. La cuchilla de corte se ubica en la parte inferior de la matriz, mientras que la de evacuación facilita la descarga de los *pellets* compactados, ver Figura 32.

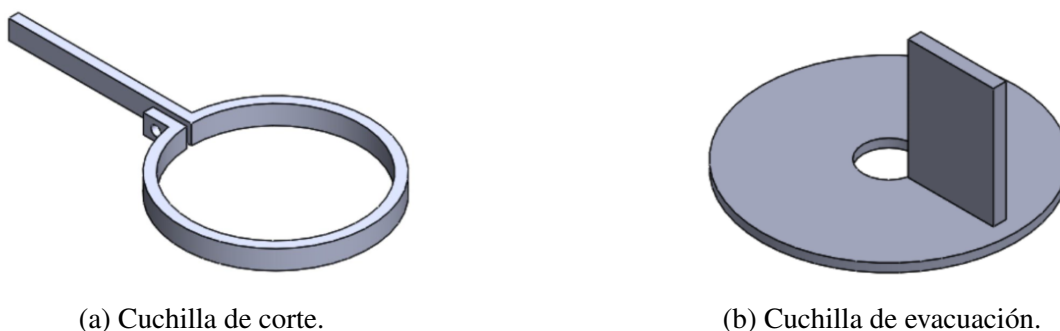


Figura 32. Componentes del bloque de corte y evacuación.

La Ingeniería Básica permitió definir los parámetros fundamentales del prototipo, asegurando la coherencia entre la potencia disponible, las características del material a procesar y la configuración de los subsistemas. En esta instancia quedaron establecidos la potencia útil de diseño, la geometría preliminar de la matriz, la disposición de los rodillos y ejes, y el esquema general del sistema de corte y evacuación. Estas definiciones, acompañadas por las iteraciones de cálculo presentadas en el Anexo B, confirmaron la factibilidad técnica de la solución propuesta.

En esta etapa también se consideró el diseño preliminar del bastidor de la máquina, concebido como la estructura portante que asegura la correcta distribución espacial de los componentes principales y permite su montaje con la rigidez necesaria. Para su construcción se previó el uso de perfiles estructurales de acero UPN 80, disponibles en *stock* por parte del Comitente, lo que orientó la selección del material desde criterios de factibilidad y economía de recursos.

No obstante, las decisiones adoptadas en esta etapa constituyen aproximaciones iniciales, apropiadas para sustentar la factibilidad del concepto y guiar el diseño final. Sobre la base de estos resultados se avanzó hacia la Ingeniería de Detalle, etapa en la cual se profundizaron los cálculos estructurales de los componentes críticos y se generó la documentación técnica necesaria para la fabricación y montaje del prototipo.

4.4. Ingeniería de Detalle

Sobre la base de los parámetros preliminares definidos en la Ingeniería Básica, en esta etapa se profundizó el desarrollo del prototipo mediante la generación de la documentación técnica necesaria para su fabricación y montaje. El objetivo principal fue transformar las dimensiones y configuraciones preliminares en especificaciones completas, incorporando tolerancias, materiales normalizados y procedimientos de verificación estructural.

Se elaboraron los planos de cada uno de los componentes no estandarizados, se seleccionaron los elementos comerciales disponibles en el mercado (rodamientos, reductor, fijaciones, entre otros), y se definió el esquema de ensamblaje del prototipo (Figura 33). Toda esta documentación, que asegura la reproducibilidad del diseño y su trazabilidad, se encuentra recopilada en el Anexo C.

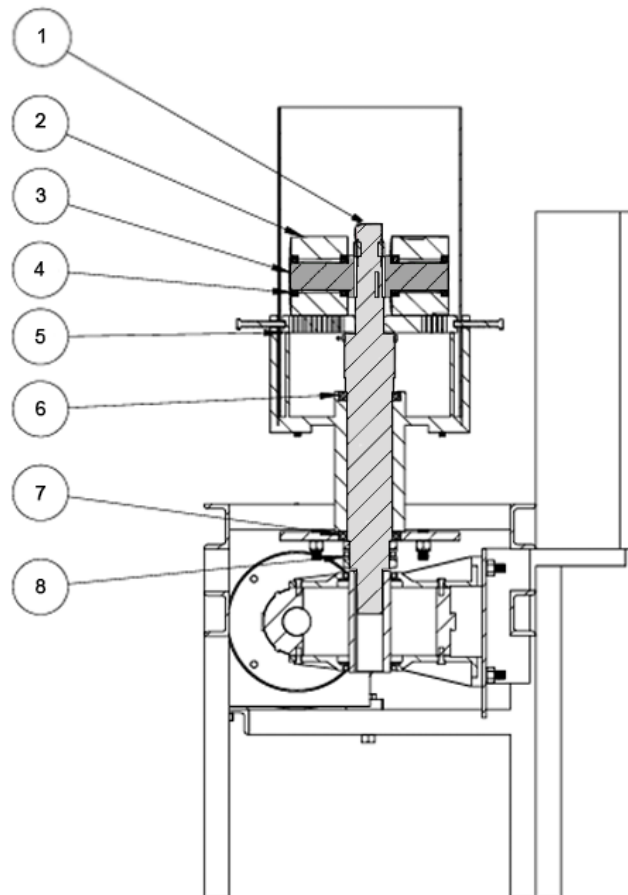


Figura 33. Vista principal en corte del prototipo.

Referencias: (1) Eje Principal, (2) Rodillos, (3) Eje Secundario, (4) Rodamiento SKF-61910, (5) Matriz, (6) Rodamiento SKF-61916, (7) Rodamiento SKF-61916, (8) Rodamiento SKF-51314.

La Ingeniería de Detalle también implicó la verificación de los componentes críticos, tales como ejes y rodillos, con el fin de garantizar su seguridad y funcionalidad bajo las condiciones de operación previstas. Para ello se utilizaron herramientas de cálculo asistido por computadora y *software* especializado en el dimensionamiento de elementos de máquinas, lo que permitió evaluar tanto esfuerzos y deformaciones como la interacción entre los distintos subsistemas.

4.4.1. Eje Principal

En esta etapa se evaluó la seguridad y la funcionalidad del diseño del eje bajo las condiciones de operación previstas. Para este análisis se empleó el *software* KissSoft (www.kisssoft.com), una herramienta ampliamente utilizada en la industria para el dimensionamiento y verificación de componentes mecánicos.

El primer paso consistió en modelar la geometría del eje a partir de los planos y especificaciones de detalle. En el *software* se ingresaron todos los parámetros geométricos relevantes: diámetros, radios de acuerdo, longitudes de segmentos y la ubicación precisa de los rodamientos. Se adoptó como material un acero AISI-SAE 1045 normalizado, con límite de fluencia $\sigma_y = 331$ MPa y resistencia a la tracción $\sigma_R = 517$ MPa.

Con la geometría y el material definidos, se incorporaron las cargas externas derivadas de la operación del sistema (ver Anexo B), así como los concentradores de tensión identificados en el diseño. El análisis incluyó además la evaluación de los rodamientos seleccionados, a partir de la información recopilada en la ingeniería básica, estos se modelaron en sus posiciones correspondientes, lo que permitió estimar su capacidad para soportar las cargas aplicadas y su influencia en la vida útil del eje. En la Figura 34 se presenta el modelo generado a partir de la información ingresada.

Con toda la información cargada, se ejecutó el análisis, obteniéndose un cálculo detallado de los esfuerzos, deformaciones y frecuencias críticas. Los resultados principales se muestran en la Figura 35.

El análisis realizado demostró que el eje principal cumple con los criterios de diseño establecidos. En cuanto a la resistencia, los resultados indican que soporta las cargas aplicadas, manteniendo factores de seguridad estático y a fatiga adecuados en todas las secciones críticas. Las deformaciones permanecen dentro de los límites aceptables, lo que

garantiza la correcta alineación del conjunto y el funcionamiento confiable del sistema sin comprometer la integridad de los rodamientos. Finalmente, las frecuencias naturales calculadas se encuentran suficientemente alejadas de las frecuencias de excitación, evitando riesgos de resonancia.

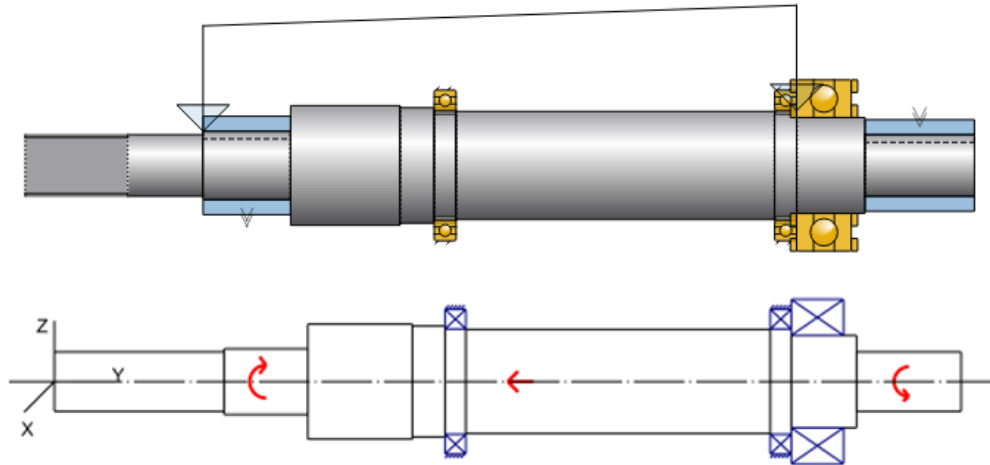
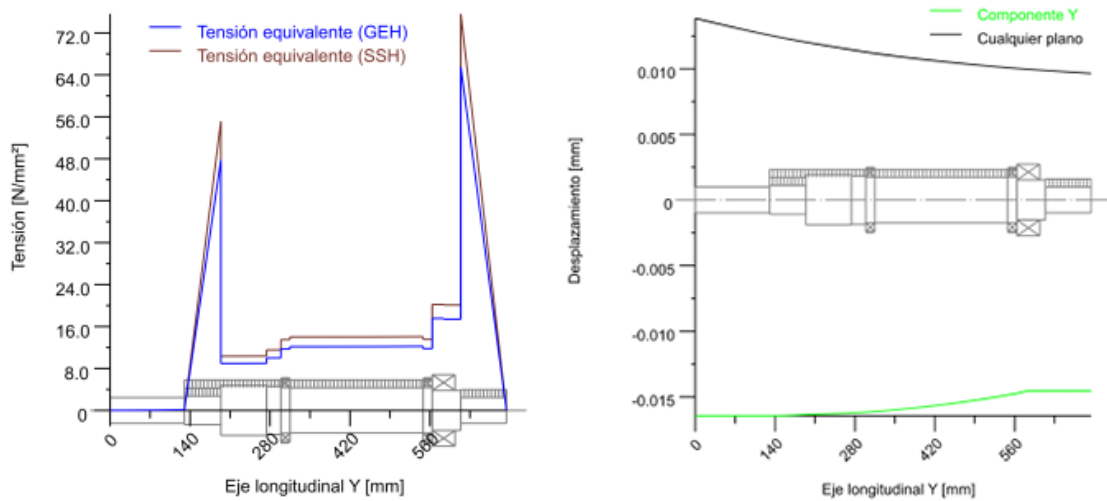


Figura 34. Modelo para la verificación del eje principal.



(a) Esfuerzos.

(b) Deformaciones.

Figura 35. Análisis de esfuerzos y deformaciones del eje.

Referencias: GEH: Tensiones de Von Mises; SSH: Tensiones de Tresca.

En paralelo al análisis del eje se evaluó el comportamiento de los rodamientos seleccionados. Para ello se consideraron las cargas radiales y axiales transmitidas en las posiciones definidas durante la ingeniería básica, verificando su compatibilidad con la

capacidad de carga dinámica y estática provista por el fabricante (www.skf.com). Los resultados indicaron que los rodamientos seleccionados soportan adecuadamente las solicitaciones impuestas, manteniendo un margen de seguridad frente a las cargas máximas de operación. Asimismo, las estimaciones de vida útil calculadas se encuentran dentro de valores aceptables para el régimen de trabajo previsto, lo que garantiza la confiabilidad del conjunto eje–rodamiento en condiciones normales de servicio.

En lo que respecta a las frecuencias críticas, el análisis ha verificado que las frecuencias naturales del eje están adecuadamente separadas de las frecuencias de excitación presentes en el sistema.

4.4.2. Eje secundario

En esta etapa se verificó el eje secundario bajo las condiciones de funcionamiento previstas, asumiendo que las cargas transmitidas por los rodillos son estáticas debido al abastecimiento continuo de materia prima al bloque de compactación. Para su análisis se aplicó la misma metodología empleada en la verificación del eje principal, utilizando el *software* KissSoft y adoptando como material el mismo que para el eje principal. En la Figura 36 se presenta el modelo generado a partir de la información ingresada.

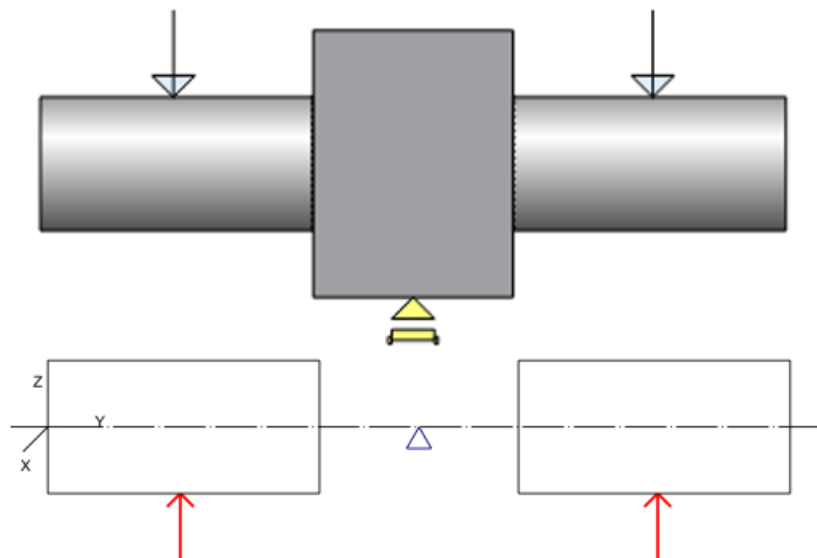


Figura 36. Modelo para la verificación del eje secundario.

El análisis efectuado con el *software*, a partir de la información previamente cargada, permitió obtener los resultados que se ilustran en la Figura 37. De esta manera se concluyó que el eje secundario cumple con los criterios de diseño establecidos. Los resultados evidencian que presenta una resistencia adecuada frente a las cargas transmitidas por los rodillos, manteniendo un coeficiente de seguridad estático elevado en las condiciones operativas previstas. Asimismo, las deformaciones calculadas se mantienen en niveles reducidos, lo que asegura la correcta alineación del conjunto y un funcionamiento confiable del sistema de compactación.

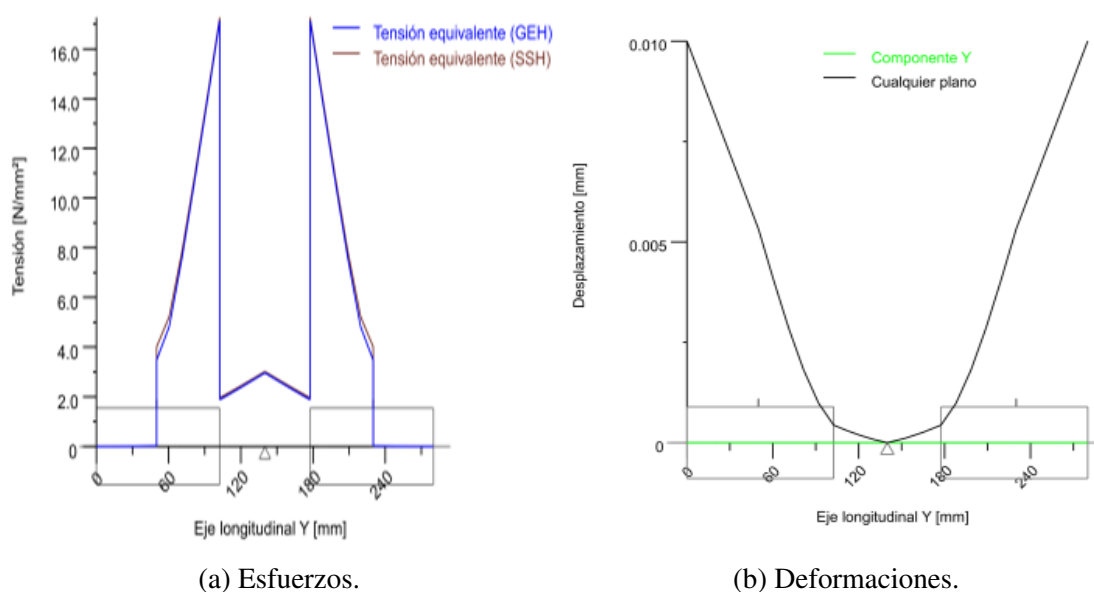


Figura 37. Análisis de esfuerzos y deformaciones del eje secundario.

Referencias: GEH: Tensiones de Von Mises; SSH: Tensiones de Tresca.

4.4.3. Rodillos

La resistencia mecánica del sistema de compactación se evaluó mediante el análisis de las presiones de contacto generadas en la interfaz rodillo–matriz. Para este tipo de problemas de contacto, se recurre habitualmente a la teoría de Hertz, que modela la distribución de tensiones y deformaciones en zonas sometidas a cargas concentradas entre cuerpos elásticos. En particular, la formulación hertziana permite determinar la presión máxima en el centro del área de contacto, así como la forma elíptica de la distribución de presiones en función de la geometría de los cuerpos y de sus propiedades elásticas (módulo de elasticidad E y coeficiente de Poisson ν).

Dichas presiones fueron calculadas con el *software* HertzWin (vinksgda.com), que implementa los modelos de contacto de Hertz para rodillos cilíndricos y matrices planas, obteniendo una representación detallada de la distribución de esfuerzos en la zona de contacto, tal como se ilustra en la Figura 38.

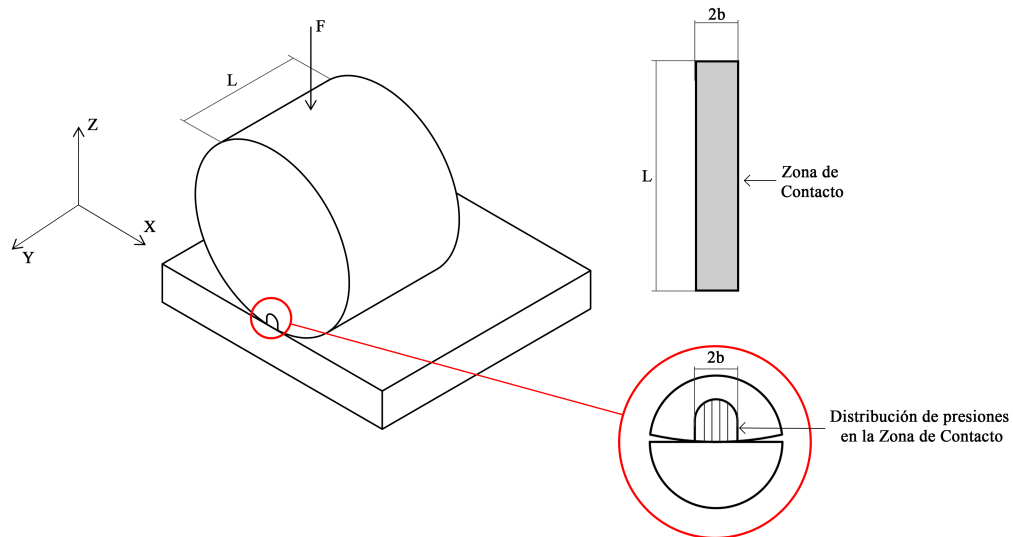


Figura 38. Esquema de la zona de contacto y distribución de presiones en los rodillos.

Para un contacto lineal bajo carga normal F , el semiancho de huella a y la presión máxima p_0 se obtienen como (Johnson, 1985; Popov, 2010):

$$a = \sqrt{\frac{4FR'}{\pi LE'}}, \quad p_0 = \frac{F}{aL},$$

donde L es la longitud de contacto, R' el radio reducido y E' el módulo reducido definido como

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}.$$

El esfuerzo cortante máximo bajo la superficie de contacto se estima en

$$\tau_{\text{máx}} \approx 0,30 p_0, \quad z \approx 0,78 a.$$

La simulación arrojó una presión máxima de $p_0 = 140,4$ MPa en el centro de la huella de contacto (Figura 38). Este valor es consistente con la teoría y permitió calcular:

$$\tau_{\text{máx}} \approx 0,30 \times 140,4 \approx 42,1 \text{ MPa.}$$

La descomposición tensional mostró:

- **Compresión** S_{ZZ} (Figura 39): con máximos de $-140,4$ MPa bajo el centro de la huella. El gradiente es simétrico y decae hacia los bordes, en concordancia con la distribución hertziana.
- **Corte** T_{ZX} (Figura 40): con valores de $\pm 35,1$ MPa, presentando el cambio de signo esperado en torno al eje de simetría. Los resultados numéricos concuerdan con la predicción teórica de $\tau_{\text{máx}} \approx 42,1$ MPa.
- **Von Mises** σ_{VM} (Figura 41): con máximos de $78,2$ MPa en la zona subsuperficial de la huella de contacto.

Verificación frente a criterios de falla, se aplicaron los siguientes chequeos:

1. **Criterio de Tresca (máxima tensión cortante):**

$$\tau_{\text{máx}} = 42,1 \text{ MPa} \ll \frac{\sigma_y}{2} = 242,5 \text{ MPa.}$$

No se prevé plastificación por corte bajo la superficie de contacto.

2. **Criterio de Von Mises (energía de distorsión):**

$$\sigma_{\text{VM, máx}} = 78,2 \text{ MPa} \ll \sigma_y = 485 \text{ MPa.}$$

El margen de seguridad es amplio, ya que la sollicitación representa sólo un 16 % del límite de fluencia.

La evaluación de tensiones de compresión, corte y Von Mises demuestra que el conjunto rodillo–matriz trabaja en el rango elástico, con valores muy inferiores al límite de fluencia. Tanto la teoría hertziana como la simulación numérica coinciden en que la máxima sollicitación ($\sigma_{\text{VM}} \approx 78$ MPa) está muy por debajo del umbral de fluencia. Bajo los criterios de Tresca y Von Mises, se confirma que no existe riesgo de plastificación local ni inicio de daño en la zona de contacto. El diseño se valida como estructuralmente seguro para la operación prevista.

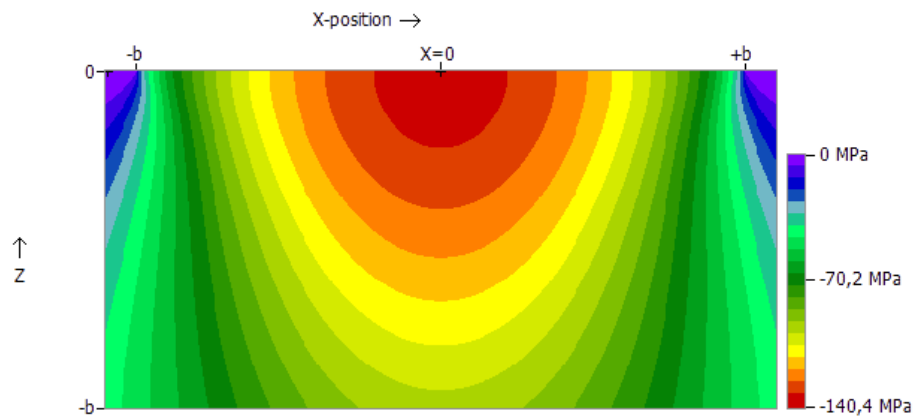


Figura 39. Distribución de tensiones de compresión en el eje Z (S_{ZZ}).

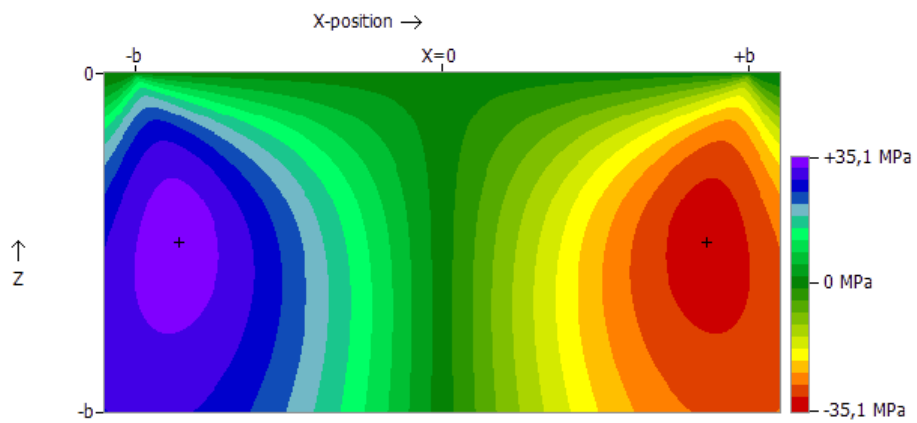


Figura 40. Distribución de tensiones de corte en el plano Z-X (T_{ZX}).

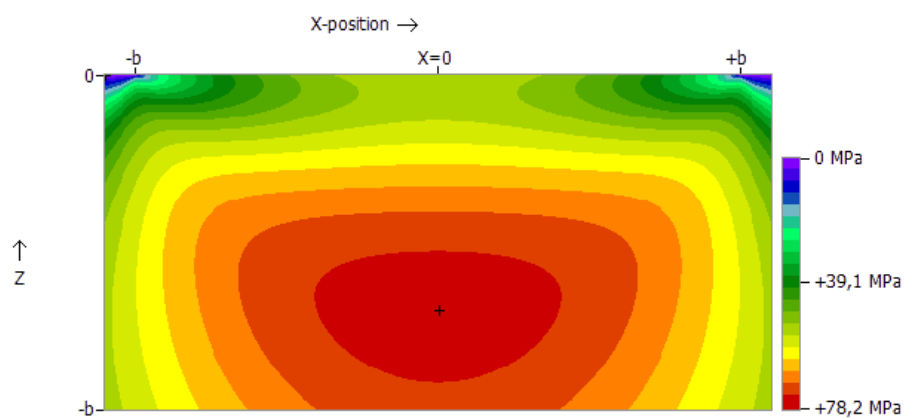


Figura 41. Tensiones equivalentes de Von Mises en los rodillos.

4.4.4. Especificaciones técnicas del prototipo

En síntesis, la Ingeniería de Detalle permitió transformar las definiciones preliminares en especificaciones completas, generando la documentación técnica necesaria para la fabricación del prototipo y validando mediante cálculos los componentes críticos del sistema. A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del prototipo y un esquema del mismo con sus dimensiones principales, ver Tabla 10 y Figura 42.

Tabla 10. Especificaciones técnicas del prototipo.

Métrica	Valor
Capacidad de producción [kg/h]	150
Porcentaje de humedad [%]	13.0
Potencia [HP]	20.0
Diámetro de la matriz [mm]	300
Diámetro de los orificios de la matriz [mm]	6.0
Ancho [mm]	680
Largo [mm]	1200
Alto [mm]	1405
Peso [kg]	600

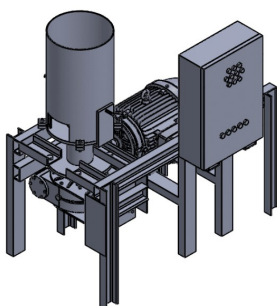
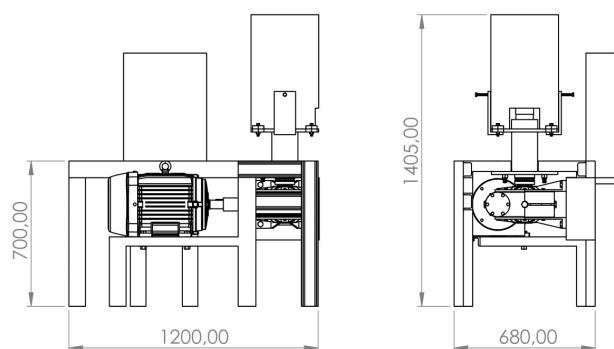


Figura 42. Dimensiones generales del prototipo.

4.5. Fabricación y Montaje

El proceso de fabricación de los componentes de la máquina se llevó a cabo conforme a la documentación generada en la Ingeniería de Detalle. Las piezas no estandarizadas, tales como matriz, rodillos y ejes, fueron mecanizadas mediante procesos de arranque de viruta, priorizando operaciones de torneado y fresado que aseguran una elevada precisión dimensional. La carcasa central fue conformada por plegado hasta alcanzar el diámetro requerido, mientras que la unión de los distintos segmentos estructurales se resolvió mediante soldadura, garantizando rigidez y continuidad mecánica.

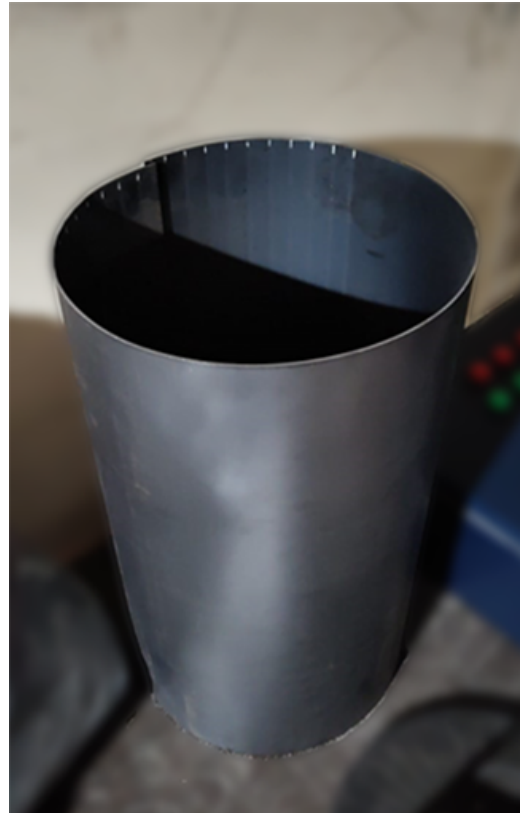
Para los elementos sometidos a condiciones severas de trabajo, como los rodillos y la matriz, se aplicaron tratamientos térmicos de cementación y temple superficial con el fin de mejorar la resistencia al desgaste y prolongar su vida útil. Estos procesos son habituales en máquinas compactadoras y se encuentran documentados en trabajos previos sobre pelletizadoras de biomasa, donde se resalta la importancia de optimizar la microestructura superficial para evitar fallas prematuras.

El montaje de la máquina implicó la integración progresiva de los subsistemas: primero el bloque de compactación (matriz, rodillos y ejes), luego el sistema de transmisión con el reductor, y finalmente los dispositivos auxiliares como cuchillas y mecanismos de descarga. Durante el ensamblaje se verificó la correcta alineación de los ejes y se controlaron los juegos de montaje de los rodamientos, para garantizar un funcionamiento confiable.

Aunque no se participó presencialmente en esta etapa, el Comitente documentó el proceso mediante un registro fotográfico que incluye tanto la fabricación de componentes como el estado final del prototipo ensamblado. Este registro constituye una evidencia objetiva de la trazabilidad del proceso y cumple el mismo propósito que en otros desarrollos experimentales, donde se enfatiza la necesidad de respaldar con documentación visual cada fase de construcción. En las Figuras 43 y 44 se muestran ejemplos de dichos registros, correspondientes a los componentes principales y al conjunto armado de la máquina.



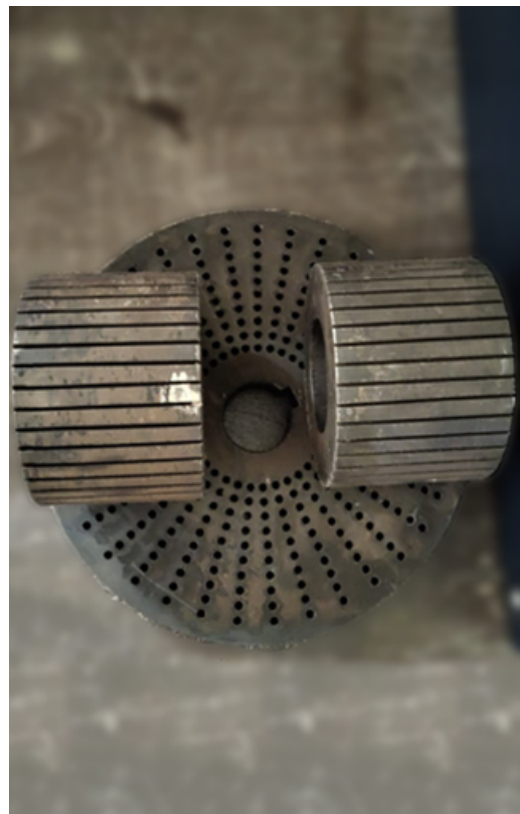
(a) Fabricación de la matriz.



(b) Carcasa central luego del plegado.



(c) Matriz y rodillos terminados.



(d) Matriz y rodillos terminados.

Figura 43. Registro fotográfico de la fabricación y montaje.



(a) Eje secundario con rodillos.



(b) Bloque de compactación.



(c) Máquina semimontada.



(d) Máquina montada.

Figura 44. Registro fotográfico de la fabricación y montaje (Continuación).

4.6. Pruebas experimentales

Con el objetivo de validar el diseño y cuantificar el desempeño del prototipo desarrollado, se llevaron a cabo pruebas experimentales orientadas a evaluar tanto el proceso de peletización como el comportamiento en servicio del equipo. Estas pruebas reprodujeron condiciones operativas representativas, registrando variables críticas como la potencia consumida, la temperatura de operación, la humedad del material y la calidad del *pellet* obtenido. La información recopilada constituye la base para contrastar los resultados con las estimaciones realizadas en la etapa de diseño, identificar posibles desviaciones y establecer lineamientos para la optimización del sistema, con el propósito de mejorar su rendimiento en escenarios operativos reales.

La temperatura inicial del aserrín se midió con un termómetro digital de aguja de inmersión, cuya geometría permite la penetración directa en la masa del material y la obtención de lecturas puntuales sin perturbaciones significativas. El contenido de humedad previo a la peletización se determinó mediante un sistema experimental compuesto por una placa Arduino UNO y un sensor resistivo YL-69. El código de control se desarrolló para digitalizar la señal analógica del sensor y convertirla en un valor porcentual de humedad. Dado que el dispositivo requiere un punto de referencia para su calibración, se adoptó como estándar el 100 % de humedad relativa, obtenido al sumergir el sensor en agua, procedimiento respaldado por documentación técnica y experiencias reportadas en la literatura especializada. Previo a cada ensayo, se determinó la densidad aparente del aserrín midiendo el volumen de una muestra en una probeta graduada y su masa en una balanza de precisión.

Durante cada ciclo de operación se registró el consumo eléctrico del prototipo a partir de la medición de la corriente máxima absorbida por el motor, utilizando una pinza amperométrica y considerando la tensión nominal de alimentación. Asimismo, la temperatura superficial de la matriz se midió al finalizar cada ciclo mediante una cámara térmica Bosch GIS 1000C, lo que permitió caracterizar las condiciones térmicas del proceso. Finalmente, la calidad del *pellet* se evaluó mediante inspección visual y dimensional de las muestras obtenidas, con el fin de relacionar las condiciones de operación con las propiedades físicas del producto.

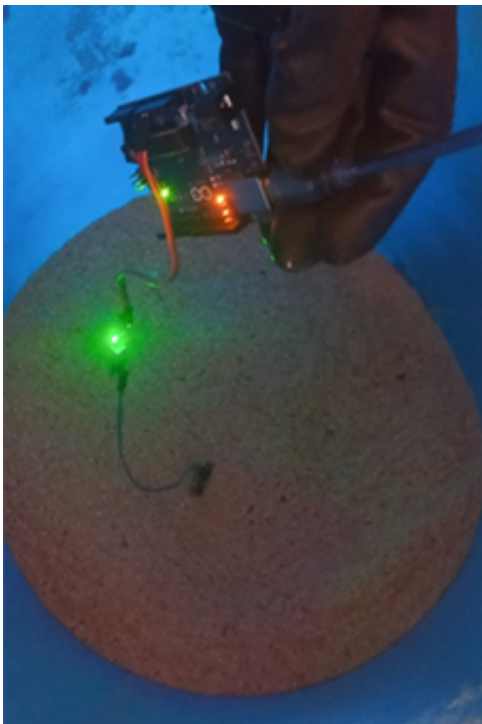
La Figura 45 muestra los principales instrumentos empleados durante las pruebas.



(a) Termómetro digital de aguja.



(b) Probeta graduada.



(c) Sensor de humedad YL-69.



(d) Calibración del Sensor YL-69.

Figura 45. Detalle de la instrumentación empleada en las pruebas experimentales.

4.6.1. Análisis de resultados

Con el fin de sintetizar los patrones de comportamiento observados en el funcionamiento del prototipo, se seleccionaron cuatro casos representativos a partir del conjunto total de ensayos realizados. Estos casos fueron definidos considerando variaciones en el contenido de humedad, la temperatura inicial del aserrín, la densidad aparente y la temperatura de la matriz, así como la incorporación de aditivos aglutinantes. El análisis comparativo de estas condiciones permitió identificar tendencias relevantes en el desempeño del proceso de peletización y en la calidad del producto final.

En la etapa de ingeniería básica se había estimado un consumo de potencia promedio en vacío de 11,96 HP. Sin embargo, las mediciones experimentales arrojaron un valor de 13,5 HP, lo que representa un incremento del 12,9 % respecto a la estimación inicial. Este valor se adoptó como línea base para determinar el incremento de potencia durante los ciclos de peletización. Cabe señalar que la medición del consumo en carga presentó ciertas dificultades debido a las fluctuaciones instantáneas de corriente durante el proceso, lo que obligó a promediar lecturas para obtener valores representativos.

A partir de las mediciones y de la observación directa del comportamiento de la máquina durante los ensayos, se identificaron cuatro condiciones iniciales relevantes que representan situaciones contrastantes en términos de humedad, temperatura y densidad del aserrín, así como de temperatura de la matriz y uso de aditivos. Estos casos se describen a continuación:

- a). **Caso 1:** El aserrín presentó un contenido de humedad del 8,5 %, temperatura inicial de 75 °C y densidad aparente de 104 kg/m³, mientras que la temperatura superficial de la matriz pasó de 53 °C a 70,4 °C. Bajo estas condiciones, el proceso se caracterizó por una alimentación fluida del material, aunque con cohesión limitada entre partículas, lo que derivó en *pellets* con resistencia mecánica moderada.
 - b). **Caso 2:** El contenido de humedad del aserrín fue del 20 %, con una temperatura inicial de 72 °C y densidad aparente de 136 kg/m³. La temperatura de la matriz pasó de 51 °C a 80,7 °C. Este nivel de humedad favoreció la cohesión de las partículas, generando *pellets* con buena integridad dimensional, aunque con defectos superficiales ocasionados por la liberación de vapor durante el enfriamiento.
-

- c). **Caso 3:** El material presentó una humedad del 11 %, temperatura inicial de 60 °C y densidad aparente de 105 kg/m³. La matriz pasó de 75,5 °C a 120,1 °C. La elevada temperatura final, combinada con una humedad intermedia, aceleró la plastificación de la lignina y mejoró la compactación, obteniéndose *pellets* de alta densidad y superficie homogénea.
- d). **Caso 4:** Se mantuvieron las condiciones iniciales del Caso 2, incorporando un 5 % en peso de almidón de maíz como aglutinante. La matriz pasó de 51 °C a 108,5 °C. El resultado fue una mejora notable en la integridad mecánica de los *pellets*, con mayor resistencia a la fragmentación y superficie más uniforme en comparación con el Caso 2, aunque con un ligero incremento en la energía de extrusión debido a la mayor cohesión interna de la mezcla.

La caracterización térmica y visual de cada ensayo complementa la información presentada. La Figura 46 muestra las imágenes termográficas capturadas al finalizar cada ciclo, mientras que la Figura 47 presenta fotografías de los *pellets* obtenidos.



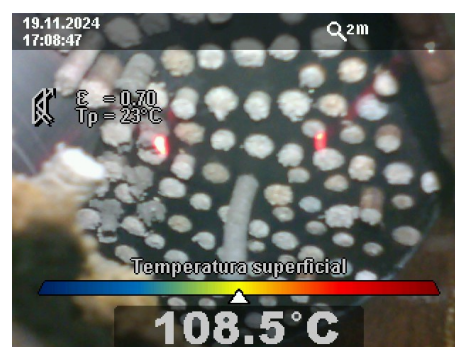
(a) Caso 1.



(b) Caso 2.



(c) Caso 3.



(d) Caso 4.

Figura 46. Imágenes termográficas de la temperatura final de la matriz en cada ensayo.



(a) Caso 1.



(b) Caso 2.



(c) Caso 3.



(d) Caso 4.

Figura 47. Registro fotográfico de los *pellets* obtenidos en los ensayos.

Del análisis comparativo se observa que:

- Los casos con mayor temperatura final de matriz, en particular el Caso 3 (120,1 °C) y el Caso 4 (108,5 °C), se asociaron a *pellets* de mayor compactación y densidad, favoreciendo la cohesión interna y una superficie homogénea.
- En el Caso 4, este efecto se potenció con la adición del 5% de almidón de maíz, lo que incrementó la resistencia mecánica aunque también elevó la energía de extrusión. En contraste, el Caso 1, con humedad reducida (8,5%) y temperatura final de 70,4 °C, produjo *pellets* de resistencia moderada debido a la limitada cohesión entre partículas.
- El Caso 2, con la mayor humedad inicial (20%) pero sin aditivos, generó *pellets* con buena integridad dimensional, aunque con defectos superficiales ocasionados por la liberación de vapor.

4.6.2. Diseño de Experimentos (DoE)

Con el fin de cuantificar el efecto de las variables operativas sobre el consumo de potencia del prototipo, se implementó un Diseño de Experimentos (DoE, *Design of Experiments*) basado en la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM, *Response Surface Methodology*) con diseño Box-Behnken (BBD, *Box-Behnken Design*) (Alhajabdalla et al., 2021).

El diseño BBD está especialmente desarrollado para ajustar modelos de segundo orden, requiriendo únicamente tres niveles para cada factor ($-1, 0, +1$) en lugar de los cinco niveles necesarios en diseños centrales compuestos (Trinh et al., 2024). Este diseño utiliza puntos en el centro de las aristas del espacio cúbico, proporcionando una alternativa económica que no contiene niveles extremadamente altos o bajos, evitando condiciones operacionales extremas que podrían ser impracticables industrialmente (G. E. P. Box y Wilson, 1951). La función de respuesta se modeló mediante un polinomio cuadrático:

$$P = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 T + \beta_{11} H^2 + \beta_{22} T^2 + \beta_{12} HT + \varepsilon \quad (1)$$

donde P representa la potencia máxima (kW), H la humedad relativa del aserrín (%), T la temperatura del aserrín de entrada ($^{\circ}\text{C}$), β_i los coeficientes del modelo y ε el error experimental. La Figura 48 presenta la superficie de respuesta tridimensional que describe el comportamiento de la potencia máxima en función de la humedad y temperatura del aserrín de entrada.

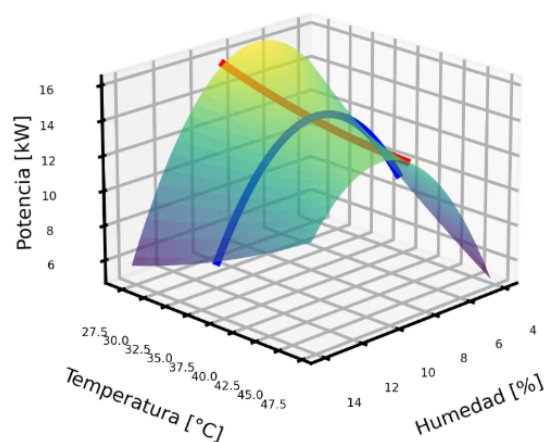


Figura 48. Superficie de respuesta.

Para interpretar el modelo y orientar decisiones, se analizaron derivadas parciales, dirección y módulo del gradiente, el Laplaciano (curvatura) y los mapas de contorno y superficie (Figura 49), en línea con las guías clásicas de RSM (Myers et al., 2016).

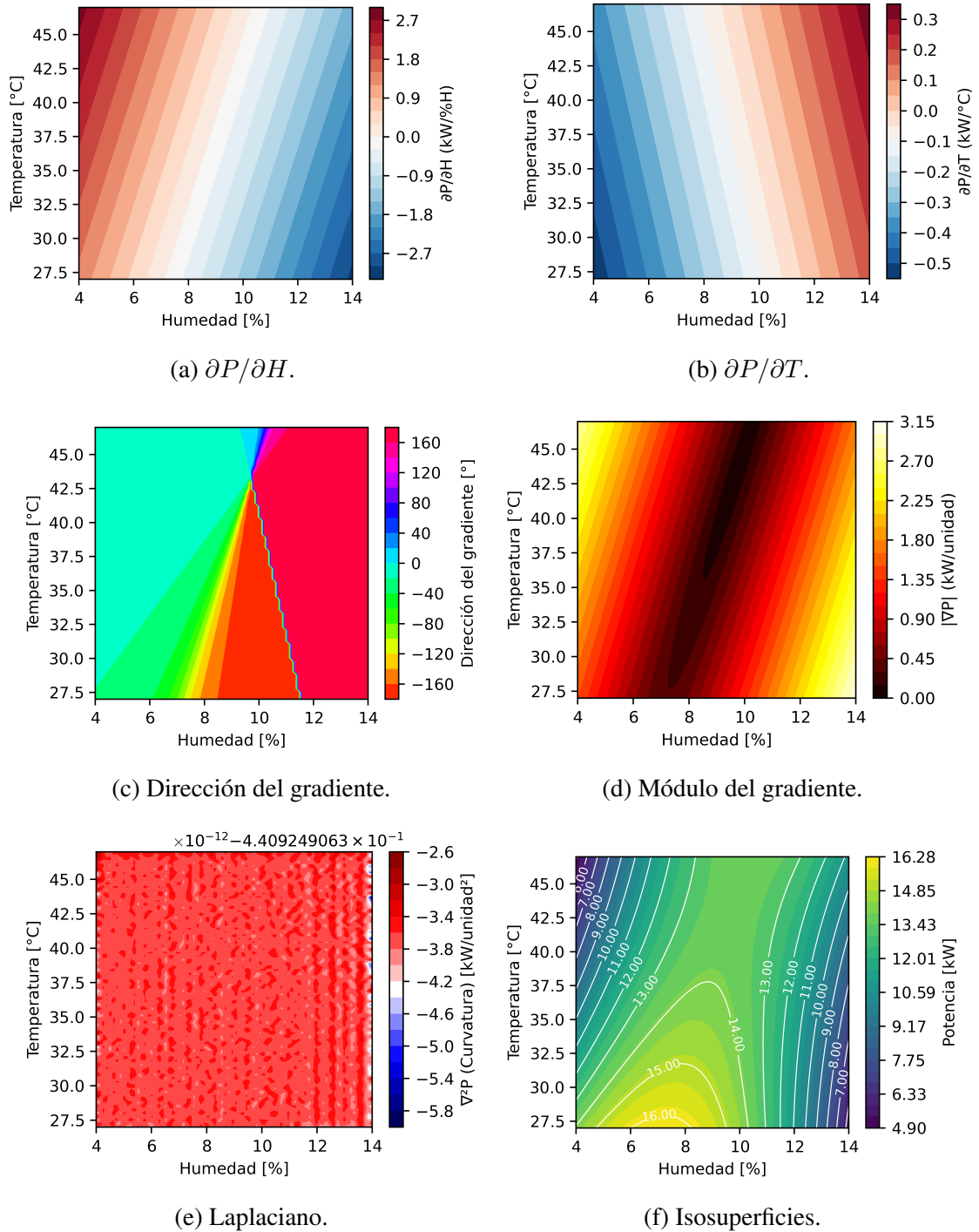


Figura 49. Análisis de sensibilidad.

La sensibilidad respecto de la humedad, $\partial P/\partial H$ (Figura 49a), presenta magnitud claramente mayor que $\partial P/\partial T$ (Figura 49b), posicionando a H como *variable dominante* de P . Se observa una *inversión de signo* de $\partial P/\partial H$ alrededor de $H \approx 9\text{--}10\%$: para humedades bajas ($4\text{--}9\%$) aumentar H eleva P ; para humedades altas ($>10\text{--}11\%$) aumentar H reduce P . Este cambio indica curvatura en la dirección de H y la relevancia de términos cuadráticos.

La sensibilidad respecto de T , $\partial P/\partial T$ (Figura 49b), depende del nivel de H : con H bajo, subir T tiende a disminuir P ; con H alto, subir T tiende a incrementarlo. La oblicuidad de los contornos confirma la interacción, tal como anticipa la teoría (Myers et al., 2016).

El ángulo de ∇P (Figura 49c) rota bruscamente al cruzar $H \approx 9\text{--}10\%$, delimitando una *frontera de cambio de política de control*. El módulo $\|\nabla P\|$ (Figura 49d) muestra un valle alrededor de $H \approx 8\text{--}9\%$ y $T \approx 33\text{--}36\text{ }^\circ\text{C}$, región *robusta* donde pequeñas variaciones apenas alteran P . El Laplaciano (Figura 49e) es predominantemente negativo, señalando una superficie globalmente cóncava con *máximo único y ancho* (Montgomery, 2017).

Los contornos (Figura 49d) y la superficie 3D (Figura 48) muestran un *máximo interno* en torno a $H \approx 7,5\text{--}8,5\%$ con T baja–media ($28\text{--}32\text{ }^\circ\text{C}$). Este patrón concuerda con reportes que vinculan humedades intermedias con mayor densificación y durabilidad del *pellet* (Stelte et al., 2011). En sentido opuesto, se observan *valles de potencia* útiles para minimizar consumo hacia el rincón *seco–caliente* (H baja / T alta) y, en menor medida, hacia H muy alta / T baja. La selección del *setpoint* debe considerar métricas de calidad (densidad aparente, *durabilidad mecánica* según la norma ISO 17831-1 (2015)) para resolver el compromiso energía–calidad.

Para *intensificar ensayos*, se recomienda:

1. Caracterizar finamente el óptimo interno en $H = 7,5\text{--}8,8\%$, $T = 28\text{--}32\text{ }^\circ\text{C}$.
2. Muestrear densamente la franja $H = 9\text{--}10\%$, $T = 33\text{--}38\text{ }^\circ\text{C}$ donde invierte el signo de $\partial P/\partial H$.
3. Confirmar los valles energéticos (H baja / T alta) contrastando con calidad (densidad, durabilidad) (Stelte et al., 2011). Replicar puntos centrales (por ejemplo,

$H = 8\%$, $T = 30\text{ °C}$) permite estimar *error puro* y realizar pruebas de falta de ajuste.

4. El orden de corridas debe aleatorizarse y, si cambian lotes, bloquear por materia prima.

Si bien el presente análisis se centró en la potencia consumida como variable de respuesta principal, la metodología DoE puede extenderse hacia un enfoque multivariado que incluya simultáneamente la calidad del *pellet* como segunda respuesta. Esto permitiría desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo que considere el compromiso entre eficiencia energética y calidad del producto. Variables como la densidad aparente del *pellet*, la resistencia mecánica según [ISO 17831-1 \(2015\)](#), el contenido de finos y la uniformidad dimensional podrían incorporarse como respuestas adicionales en el mismo diseño experimental.

Sin embargo, las limitaciones en la disponibilidad del prototipo restringieron la posibilidad de realizar estudios complementarios más extensos que permitieran caracterizar estas variables de calidad de manera sistemática. La implementación futura de algoritmos de optimización multiobjetivo facilitaría la identificación de condiciones operativas que optimicen simultáneamente múltiples criterios de desempeño ([Deb et al., 2002](#)). Esta aproximación resultaría especialmente valiosa para establecer ventanas operativas robustas que satisfagan tanto requisitos energéticos como estándares de calidad del producto final, proporcionando una base más completa para la escalabilidad industrial del proceso.

5. CONTRIBUCIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El trabajo aportó un recorrido metodológico reproducible que integró la clarificación de la tarea, la generación y depuración de conceptos y la transición a ingeniería básica y de detalle con criterios de trazabilidad. Se estableció un esquema de selección de alternativas con ponderación explícita, que dejó documentados los criterios y la justificación de la decisión.

Se introdujo un procedimiento de predimensionamiento inverso del prototipo, guiado por restricciones reales de provisión y capacidades de fabricación: se partió de la potencia disponible para dimensionar los subconjuntos funcionales principales y fijar sus relaciones geométricas, orientando el diseño hacia alternativas practicables en el contexto local.

Se realizó la verificación estructural con soporte de *software* específico y fundamentos clásicos de diseño de elementos de máquinas, cubriendo ejes, rodamientos y el par rodillo–matriz mediante chequeos de tensiones, deformaciones y separación modal; esto consolidó márgenes de seguridad y redujo la incertidumbre previa a la fabricación.

Se construyó un prototipo funcional de arquitectura modular siguiendo principios Df-MA, priorizando componentes normalizados y un proceso de fabricación accesible. La documentación técnica y el registro del proceso permitieron su ejecución por terceros.

En el plano experimental, se definió un protocolo de medición acorde a entornos de baja infraestructura y se construyó un modelo empírico mediante un DoE–RSM de segundo orden para la potencia consumida, acompañado de un análisis diferencial que aportó lectura operativa de sensibilidades, interacción entre factores y regiones de trabajo estables. El resultado fue una guía práctica para ajustar *setpoints* considerando eficiencia energética y calidad del *pellet*, y una plataforma para evolucionar hacia optimización multiobjetivo.

Finalmente, el trabajo contribuyó al “saber hacer” formativo al integrar *software* industrial, modelos teóricos y prácticas de taller en un caso real, dejando como entregables planos, criterios de verificación, guías de ensayo y lineamientos de explotación transferibles a pymes y cooperativas. Se señalaron líneas futuras para ampliar respuestas de calidad del *pellet* y obtener mayor información para un escalamiento industrial.

Dado que el prototipo operó a porcentajes elevados de la potencia disponible, con impacto en la continuidad de peletización y en la vida útil del conjunto motriz, motivó la búsqueda de sus causas evaluando el diseño a partir de recomendaciones dadas en la bibliografía específica. Se constató que el diseño y las características de la matriz influyen directamente en el consumo energético. En este contexto, [Nielsen Klinge et al. \(2019\)](#) postula que una matriz se divide en tres zonas: área activa, área de transición y área muerta (Figura 50).

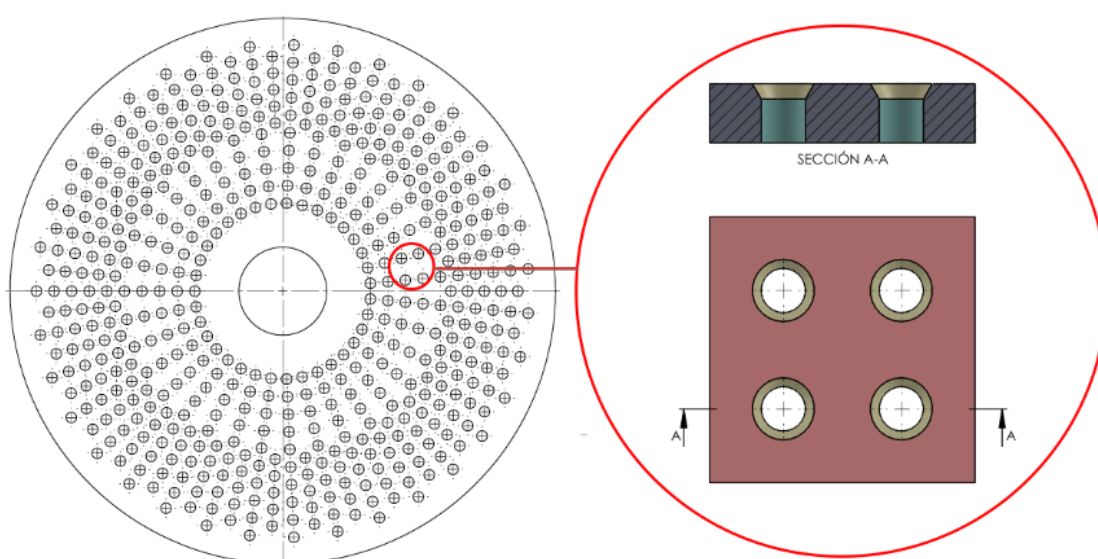


Figura 50. Áreas representativas de la matriz.

Referencias: Área muerta (rojo), Área de transición (amarillo), Área activa (verde).

A mayor área muerta, se observó un incremento en el consumo de energía y en la temperatura de la matriz durante la peletización. No obstante, un diseño óptimo debe equilibrar la maximización del área activa con la resistencia del componente. Otro factor influyente es el ángulo y la profundidad del cono de entrada: ángulos mayores incrementan el consumo y las fuerzas del proceso, con mayor desgaste de la matriz. Para aserrín, se adoptó un ángulo de avellanado de 60° . En cuanto a la profundidad de avellanado, también eleva el consumo a medida que aumenta; sin embargo, este parámetro no puede analizarse de forma aislada, pues interactúa con el tamaño del área muerta, cuya longitud no debería exceder 2,5 mm.

Finalmente, la longitud del canal incide en el consumo de potencia, ya que relaciones

L/D mayores generan más fricción; no obstante, esta variable debe evaluarse de forma conjunta con las anteriores y, a la fecha, no existen estudios concluyentes específicos para aserrín.

En consecuencia, se plantea para futuras pruebas un rediseño de la matriz para favorecer la fluidez del material y reducir el consumo y el calor generado entre rodillos y matriz. Considerando los parámetros mencionados y modificando el patrón de agujereado para reducir el área muerta, se propone el rediseño ilustrado en la Figura 51.

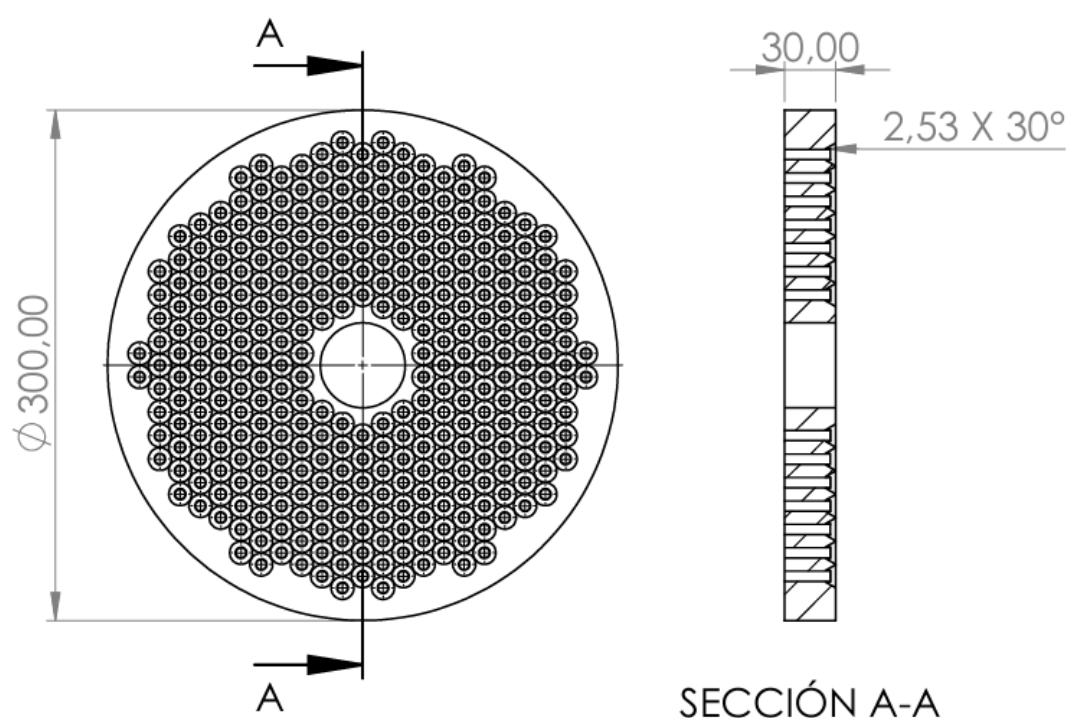


Figura 51. Rediseño propuesto para la matriz.

De manera complementaria, y dado que los estudios sobre parámetros de peletización específicos para aserrín siguen siendo escasos, estas líneas se incorporan explícitamente al plan de mejora como frentes experimentales prioritarios:

- Analizar la influencia de distintas especies de madera sobre los parámetros de operación.
- Evaluar la influencia de diferentes aglutinantes externos sobre el desempeño del proceso y del producto.

Con estos lineamientos se define una dirección de mejora que conecta lo realizado con los pasos siguientes:

1. Rediseño de la matriz: reducción del área muerta, ajuste del ángulo de entrada y de la relación L/D .
2. Adecuación del tren motriz según los perfiles de carga observados.
3. Ampliación del DoE hacia una optimización multiobjetivo que integre potencia, productividad y calidad del *pellet*.

En paralelo, se priorizará la instrumentación para control térmico, la estandarización de protocolos de ensayo y la incorporación de métricas de calidad en línea, habilitando iteraciones breves de diseño–prueba–aprendizaje y facilitando la transferencia a planta piloto. Con esta hoja de ruta, las contribuciones no solo cierran el estado actual, sino que abren la fase siguiente orientada a validar mejoras y escalar con menor incertidumbre.

6. CONCLUSIONES

Durante la ejecución del proyecto fue necesario profundizar en aspectos específicos del proceso de peletización, en la interacción rodillo–matriz y en la integración de técnicas de optimización experimental. La colaboración con especialistas enriqueció la perspectiva técnica del desarrollo, mientras que la comunicación sostenida con el equipo de fabricación y el Comitente permitió consolidar competencias en gestión de proyectos tecnológicos.

El trabajo estableció una metodología transferible que integra criterios de diseño, fabricación y optimización operativa, generando entregables concretos: planos de fabricación, procedimientos de ensayo, modelos predictivos y lineamientos de explotación. Estos elementos constituyen una base sólida para su implementación en pymes y cooperativas del sector forestal, cumpliendo con el objetivo de transferencia tecnológica planteado inicialmente.

Si bien se han logrado avances significativos en la caracterización de los parámetros de peletización, la integración de estos conocimientos con el desempeño a escala industrial requiere validaciones adicionales. El marco experimental desarrollado proporciona las herramientas necesarias para abordar esta transición, especialmente mediante una optimización multiobjetivo que incorpore criterios simultáneos de eficiencia energética, productividad y calidad del producto final.

La plataforma experimental construida facilita la implementación de ciclos iterativos *diseño–prueba–aprendizaje*, permitiendo la optimización progresiva de configuraciones y minimizando los riesgos técnicos y operativos asociados al escalado hacia planta piloto.

En términos personales, este Proyecto Integrador Profesional brindó la oportunidad de aplicar de manera integrada los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, participar activamente en la resolución de desafíos técnicos reales y desarrollar competencias específicas en diseño, fabricación y experimentación. Esta experiencia resultó especialmente enriquecedora para la consolidación de una perspectiva sistémica del ejercicio profesional como ingeniero mecánico, integrando aspectos técnicos, de gestión y de transferencia tecnológica en un entorno concreto de aplicación.

7. REFERENCIAS

- AEBIOM Statistical Report. (2017). European Biomass Association Statistical Report. *European Bioenergy Outlook*.
- AEBIOM Statistical Report. (2024). European Biomass Association Statistical Report. Fossil Fuel Reliance Stalls EU Pellet Market Growth. *European Bioenergy Outlook*.
- Aguilar, F. X., Brandeis, C., Glavonjić, B., Mabee, W., & Vinterbäck, J. (2023). *2023 Data Brief on Wood Energy: Wood pellets and wood fuel* (Data Brief). United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Food y Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Geneva, Switzerland.
- Alhajabdalla, M., Mahmoud, H., Nasser, M. S., Hussein, I. A., Ahmed, R., & Karami, H. (2021). Application of Response Surface Methodology and Box–Behnken Design for the Optimization of the Stability of Fibrous Dispersion Used in Drilling and Completion Operations [PMID: 33553870]. *ACS Omega*, 6(4), 2513-2525. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04272>
- Araujo, R. A. (2019). *Diseño y Cálculo de una Máquina Peletizadora para la Producción de Alimento Animal* (inf. téc.). Universidad Tecnológica de Pereira.
- Argentina, I. (2022). Cadenas Productivas Provinciales 2020. Impacto de la pandemia. *INDEC, 1*.
- Arpi Trujillo, J., & Calderón Toral, C. (2010). *Diseño de una máquina peletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético*. (inf. téc.). Universidad Politecnica Salesiana.
- Box, G. E. P. [G. E. P.], & Wilson, K. B. (1951). On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 13. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x>
- Box, G. E. P. [George E. P.], & Draper, N. R. (2007). *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses* (2.^a ed.). Wiley.
- Brotz, G. R. (1994). Pelletizing Roll [U.S. Patent and Trademark Office].
- Burba, J., Grancara, N., Castillo, J., & Lanzavechia, S. (2018). *Aprovechamiento de hojas secas de ajo para la elaboración de pellets combustibles* (Documento N.º Pro-
-

-
- yecto Ajo/INTA 124). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria La Consulta.
- Capitanich, A., Salvare, F., Douat, G., & Andreassi, L. (2022). *Caracterización y uso de biocombustibles elaborados con fines domésticos a partir de residuos forestales de Pinus ponderosa en Bariloche, Argentina* (inf. téc.). Ciencia Investigación Forestal.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Flach, B., & Bolla, S. (2022). *EU Wood Pellet Annual* (Voluntary Report N.º E42022-0049) (Report Category: Biofuels, Wood Products; Post: The Hague; Approved By: Elizabeth Leonardi). USDA Foreign Agricultural Service. The Hague, European Union.
- Guerra Ludeña, S. R. (2013). *Diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa Reciclajes MYS S.A.* (inf. téc.). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Ibrahim, M. M., Younis, S. M., Taieb, A. E.-A. Z., Azzam, B., & Ghonimy, M. (2025). Design and performance assessment of a pelleting machine for sustainable biomass pellet fuel production from plant residues. *Scientific Reports*, 15, 12879. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93058-6>
- ISO 17831-1. (2015). *Solid Biofuels — Determination of Mechanical Durability of Pellets — Part 1: Pellets*. International Organization for Standardization.
- ISO-17225-1. (2021). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales*. (Standard). International Organization for Standardization.
- ISO-17225-2. (2014). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera*. (Standard). International Organization for Standardization.
- ISO-17829. (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y el diámetro de pélets* (Standard). International Organization for Standardization.
-

-
- ISO-17831. (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas* (Standard). International Organization for Standardization.
- Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.
- Maslatón, C., González, A., & Miño, A. (2011). *Cifras para pensar. Pellets de madera para usos energéticos*. (inf. téc.). INTI.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9.^a ed.). Wiley.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (4.^a ed.). Wiley.
- Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., & Felby, C. (2009). Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel Pellets. *Wood and Fiber Science*, 41(4), 414-425.
- Nielsen Klinge, S., Mando, M., & Rosenorn Brinch, A. (2019). *Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process*. (inf. téc.). Aalborg University.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook. The production and thermal utilisation of biomass pellets*. Earthscan.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2007). *Engineering Design - A Systematic Approach*. Springer-Verlag London.
- Popov, V. L. (2010). *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*. Springer.
- Ramos, B., & Caiza, J. (2022). *Diseño y construcción de una máquina peletizadora que utilice residuos de madera para la empresa Decor Parquet en la ciudad de Ambato* (inf. téc.). Universidad Técnica de Ambato.
- Ramos, M. A. (2019). *Modificación de diseño de máquina peletizadora para alimentos deshidratados utilizando energías alternas* (inf. téc.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rowell, R. M. (2005). *Wood Chemistry and Wood Composites*. Taylor y Francis.
- Semenov, A. B., Fomina, O. N., Muranov, A. N., Kutsbakh, A. A., & Semenov, B. I. (2019). The Modern Market of Blank Productions in Mechanical Engineering and the Problem of Standardization of New Materials and Technological Processes.
-

- Advanced Materials & Technologies*, 1, 3-11. <https://doi.org/10.17277/amt.2019.01.pp.003-011>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Henriksen, A. B., & Thomsen, U. B. (2011). A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 910-918. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>
- Strefling, M. (1981). Alfalfa Pelletizing Apparatus [U.S. Patent and Trademark Office].
- Torres, D. V., Socarrás, I. M., & Espinosa, B. G. G. (2012). Estudio teórico de la combustión de pellets de biomasa procedente de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 73-78.
- Trinh, V. L., Nguyen, X. C., Nguyen, T. S., Nguyen, H. K., Nguyen, H. H., Hoang, X. K., Nguyen, H. S., Tran, V. H., & Nguyen, T. P. (2024). Using Box-Behnken Design for Optimizing the Processing Parameters for the Injection Molding Process. En Y.-P. Huang, W.-J. Wang, H.-G. Le & A.-Q. Hoang (Eds.), *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development* (pp. 127-135). Springer Nature Switzerland.
- Ullman, D. (2010). *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2015). *Product Design and Development*. Editorial Mc Graw-Hill.
- Zambare, V., Jacob, S., Din, M. F. M., & Ponraj, M. (2023). Box–Behnken Design-Based Optimization of the Saccharification of Primary Paper-Mill Sludge as a Renewable Raw Material for Bioethanol Production. *Sustainability*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310740>
-

A. Anexo I: *Benchmarking*

A continuación, se presentan los modelos de máquinas peletizadoras analizados. Los datos técnicos del fabricante pueden ser consultados a través del enlace web que se indica en el pie de cada imagen.



Modelo GWPE 250

www.agromaquinarias.cl



Modelo MP200

www.funaringeneria.com.ar



Modelo MKFD230C

www.meelko.com



Modelo MKFD150C

www.meelko.com

Figura 52. *Benchmarking*.

**Modelo MP300**

www.funaringenieria.com.ar

**Modelo Power Classic 30**

www.agrimaquinas.com

**Modelo Power Classic 20**

www.agrimaquinas.com

**Modelo Power Classic 15**

www.agrimaquinas.com

**Modelo P230UG**

www.surgali.com

**Modelo Surgali 220**

www.surgali.com

Figura 53. *Benchmarking* (Continuación).



Modelo P395UG

www.surgali.com



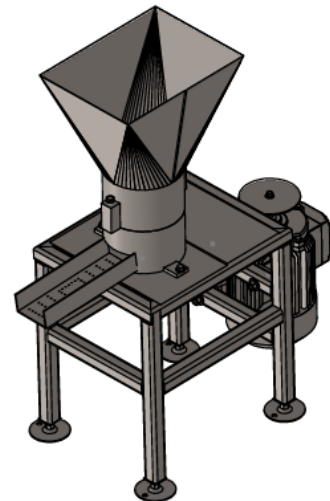
Modelo RKL

www.mikim-oilpress.en.made-in-china.com

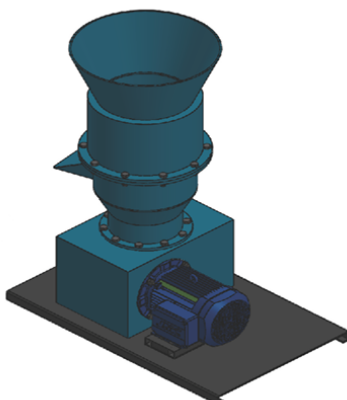


Modelo P230UG

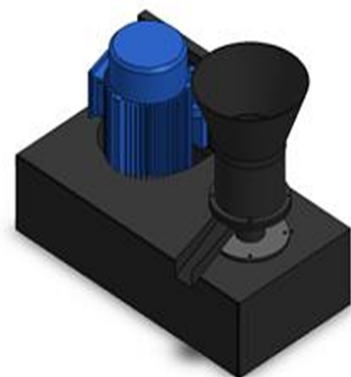
www.ecopelletmills.com



Fuente: Araujo (2019)



Fuente: M. A. Ramos (2019)



Fuente: B. Ramos y Caiza (2022)

Figura 54. *Benchmarking* (Continuación).

B. Anexo II: Dimensionamiento de componentes.

B.1. Dimensionamiento de componentes.

Con una potencia nominal de 20 CV para el prototipo, se consideró la eficiencia de los componentes de transmisión. La transmisión de tornillo sin fin y corona posee un rendimiento del 70-90 %, mientras que el motor eléctrico opera con una eficiencia del 85-90 %. Considerando el escenario más conservador, se estimó una potencia útil de $12hp$. Este valor será el punto de partida para un modelo matemático que, a través de iteraciones, permitirá encontrar la solución de diseño más óptima.

Inicialmente se debe definir el radio de los rodillos de manera que se verifique la siguiente relación.

$$\mu \geq \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R - \frac{\Delta h}{2}} \quad (2)$$

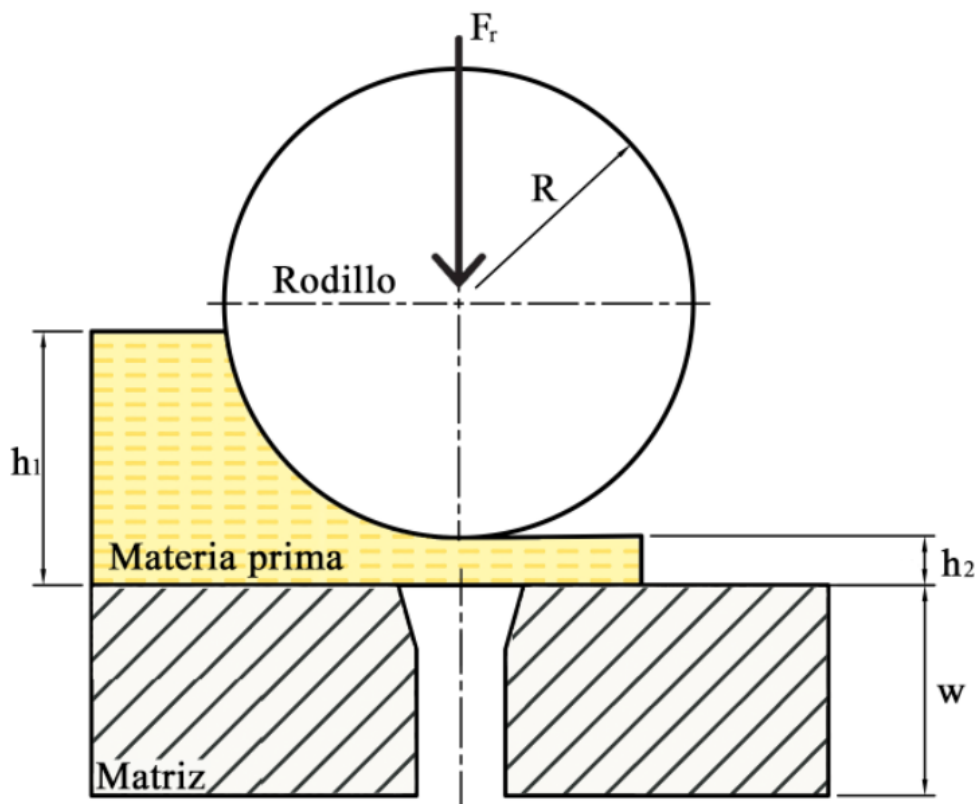


Figura 55. Matriz y rodillos con dimensiones características.

Donde $\Delta h = h_1 - h_2$ es la diferencia de alturas de la materia prima antes y después

que pase el rodillo, R es el radio de los rodillos y μ el coeficiente de fricción entre acero y madera, ver Figura 55. Los resultados obtenidos se muestran a continuación,

$$\mu \geq \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R - \frac{\Delta h}{2}} \rightarrow 0,8 \geq 0,58 \quad (3)$$

Para $R \rightarrow 70mm$ y $\Delta h \rightarrow 18mm$.

Para estimar la fuerza de compactación de los rodillos sobre la materia prima se utiliza la siguiente ecuación, [Semenov et al. \(2019\)](#)

$$F_c = 1,38\sigma_{f_m}w\sqrt{R\Delta h} \rightarrow F_c = 2436N \quad (4)$$

Donde w = ancho del rodillo, σ_{f_m} es el esfuerzo de flujo medio del material, determinado como,

$$\sigma_{f_m} = \frac{\sigma_{t_1} + \sigma_{t_2}}{2} \rightarrow \sigma_{f_m} = 0,49MPa \quad (5)$$

Donde σ_{t_1} y σ_{t_2} son los esfuerzos de flujo antes y después de que la materia prima sea comprimida por el rodillo respectivamente.

La relación entre el área de entrada y salida de los orificios de la matriz (O_{ar}) tiene una influencia directa sobre la fuerza de los rodillos, ver figura 56.

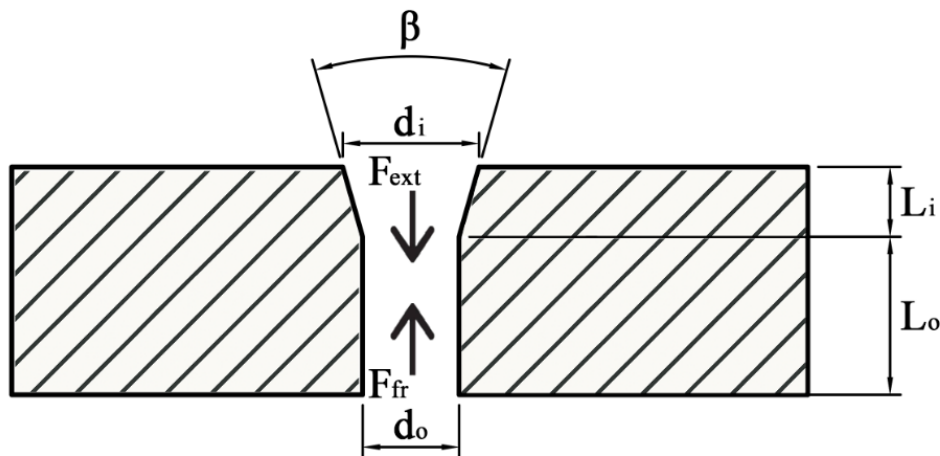


Figura 56. Dimensiones de los agujeros de la matriz.

$$O_{ar} = \frac{A_i}{A_o} = \frac{d_i^2}{d_o^2} \rightarrow O_{ar} = \frac{7^2}{6^2} \quad (6)$$

La presión que se ejerce para la extrusión se puede calcular como,

$$P_{ext} = \sigma_{f2} \ln O_{ar} \rightarrow P_{ext} = 0,31MPa \quad (7)$$

Luego, la fuerza de extrusión para el proceso de peletización se calcula como,

$$F_{ext} = P_{ext}A_i \rightarrow F_{ext} = 12N \quad (8)$$

Otra de las fuerzas que influyen en el proceso es la de fricción que se produce a medida que el aserrín fluye por los agujeros de la matriz. Esta fuerza de fricción se puede calcular como,

$$F_{fr} = \mu P_{ext}A_s \rightarrow F_{fr} = 0,6 * 0,81MPa * \pi * 6mm * 30mm = 139MPa \quad (9)$$

Finalmente la fuerza que se genera sobre los rodillos será igual a la suma de las fuerzas de compactación y de extrusión multiplicada por la cantidad de agujeros por los que pasa el rodillo simultáneamente (N_o).

$$F_r = F_c + N_o(F_{ext} + F_{die}) \rightarrow F_r = 2436N + 10(12N + 139N) = 3942N \quad (10)$$

El torque generado por estas fuerzas será igual a

$$T = N_r \times \mu_{roll} \times F_r \times (D_{roller}/2) \rightarrow T = 2 * 0,6 * 3791N * \frac{180mm}{2} = 426Nm \quad (11)$$

Donde N_r es la cantidad de rodillos, μ_r es el coeficiente de fricción de compactación entre el aserrín y la matriz, D_r es la distancia entre rodillos, ver Figura 57.

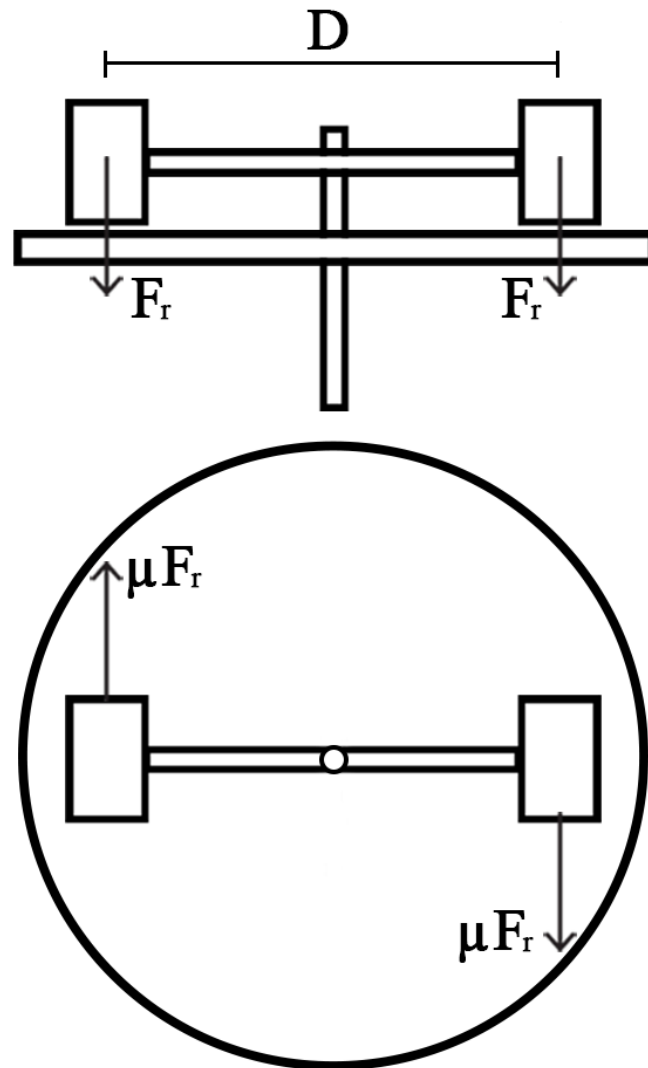


Figura 57. Dimensiones características del módulo de compactación.

Finalmente la potencia requerida para el proceso de peletizado será igual a

$$\text{Power} = T \times \omega \rightarrow \text{Power} = 426Nm * \frac{2\pi * 200rpm}{60} = 11,96hp \quad (12)$$

Donde ω es la velocidad de giro de los rodillos.

B.2. Cálculo de los esfuerzos en el sistema de transmisión.

Parte de los esfuerzos a los que se someterá el eje principal son provenientes de la transmisión de potencia mediante el reductor. Como se mencionó anteriormente la máquina dispone de una potencia útil de 9 kW. La relación de transmisión es igual al cociente

entre la velocidad de giro del motor y la velocidad de giro de los rodillos,

$$i = \frac{\text{Velocidad del motor}}{\text{Velocidad de los rodillos}} \rightarrow \frac{1450rpm}{200} = 7,25 \quad (13)$$

A partir de la potencia útil se puede calcular el momento torsor relacionando la potencia y la velocidad angular,

$$T_{tr} = \frac{P_{salida}}{\omega} \rightarrow 429,7Nm \quad (14)$$

B.3. Dimensionamiento del eje principal.

Para realizar el predimensionamiento del eje principal se identificó el estado de cargas a partir de los cálculos realizados anteriormente. A continuación se presenta la cadena cinemática de la máquina y las sollicitaciones sobre los ejes.

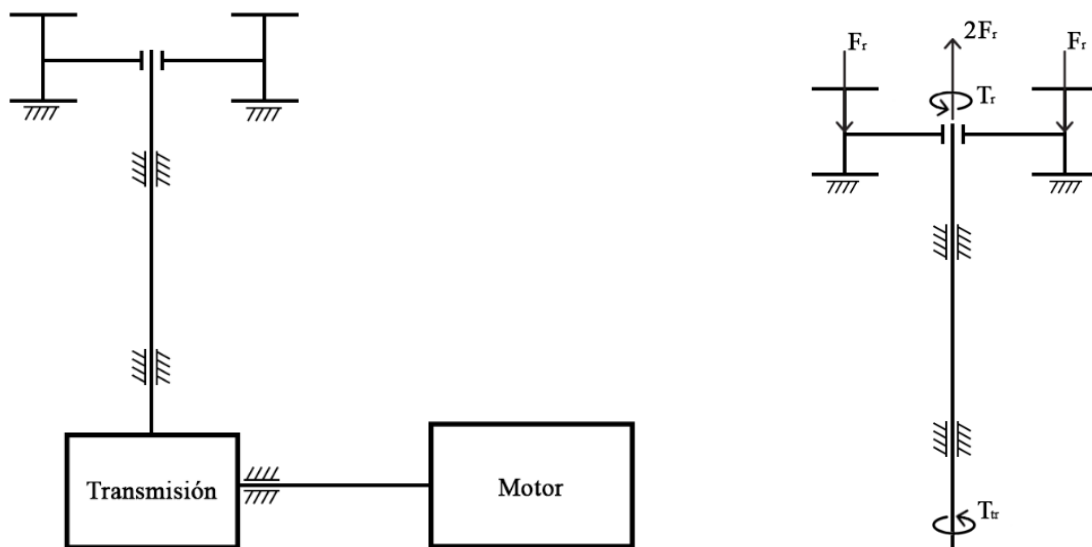


Figura 58. Cadena cinemática de la máquina.

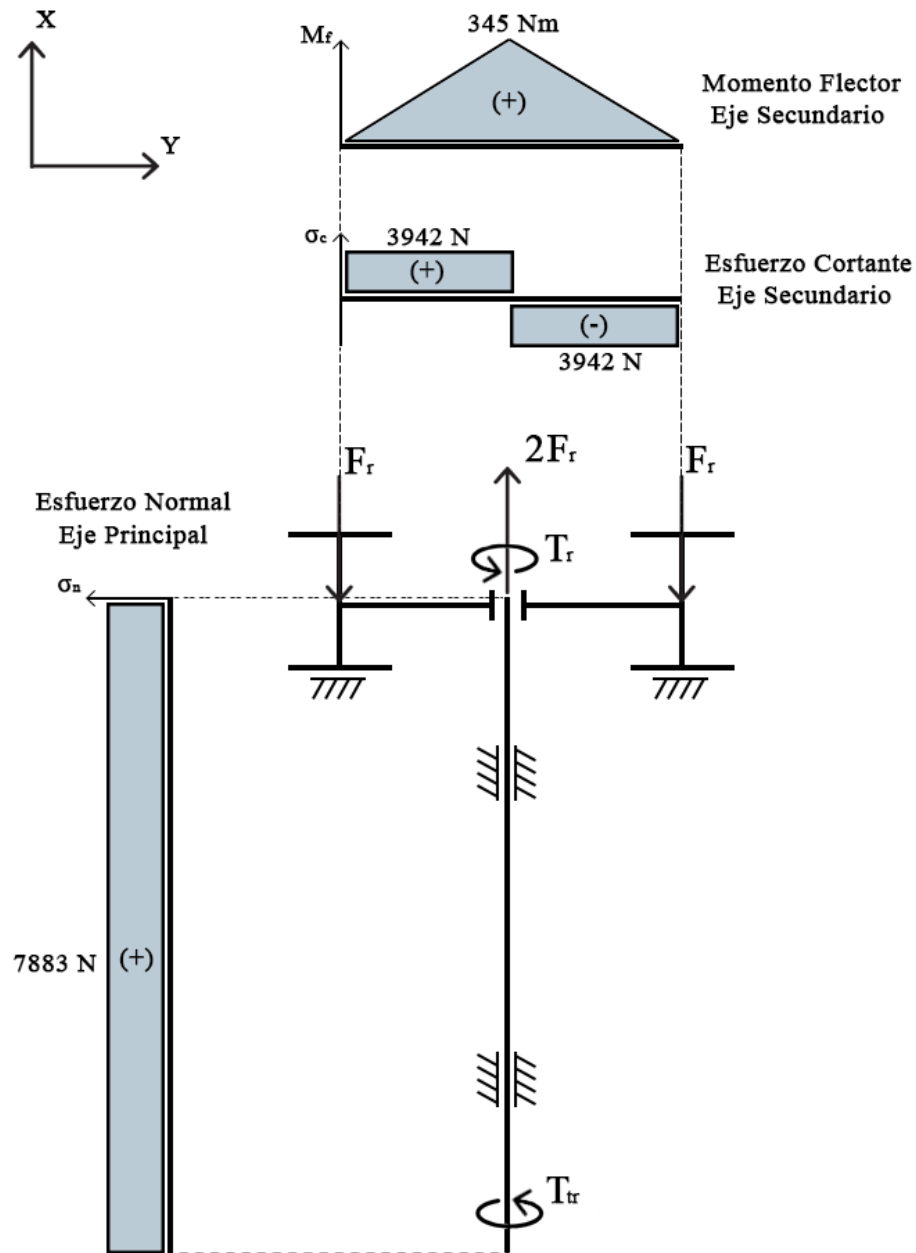


Figura 59. Diagrama de esfuerzos de los ejes de la máquina.

Mediante las ecuaciones clásicas de verificación de tensiones se obtuvo un diámetro de referencia. Luego de realizar las correspondientes iteraciones de cálculo se adoptó un diámetro mínimo del eje de 45mm, el cuál satisface tanto la verificación estática como dinámica a los esfuerzos mencionados anteriormente. A continuación, se presenta la metodología de cálculo y los resultados obtenidos para dicho diámetro.

Suponiendo que el material es isoentrópico, despreciando el peso del eje y puntuali-

zando las cargas distribuidas en el punto medio de aplicación se realizaron los diagramas de esfuerzos presentados anteriormente.

A partir del estado de cargas identificado se realiza el el análisis estático de fuerzas y momentos.

$$\sum F = 0 \rightarrow 2F_r = R_x \rightarrow R_x = 7883,3N \quad (15)$$

$$\sum M_x = 0 \rightarrow M_x = T_{tr} - T_r \rightarrow M_x = 4Nm \quad (16)$$

Siendo el eje un componente rotante susceptible a esfuerzos alternativos o fluctuantes, y bajo la necesidad de tener un cambio de sección para realizar el apoyo de los rodamientos, el área del cambio de diámetro fue seleccionada como crítica. Este cambio geométrico funciona como un concentrador de tensiones, afectando negativamente la vida útil a la fatiga del elemento.

De manera estática se calcula la tensión equivalente de los esfuerzos que se aplican en dicha sección.

$$\sigma_{eq} = (\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2)^{1/2} \rightarrow \sigma_{eq} = 41,5MPa \quad (17)$$

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot F_r}{\pi \cdot d^2} \rightarrow \sigma_x = 5MPa \quad (18)$$

$$\tau = \frac{16 \cdot \tau_r}{\pi \cdot d^3} \rightarrow \tau = 23,8MPa \quad (19)$$

$$\sigma_{eq} < \frac{\sigma_y}{n} \rightarrow n = 11,7 \quad (20)$$

Utilizando un acero AISI/SAE 1045, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 485 MPa y una tensión de rotura de 515 MPa.

Dado que el eje fue diseñado para asegurar una resistencia a la fatiga aceptable, se procedió a verificar que el diámetro de pre-dimensionamiento fuera coherente con las ecuaciones de verificación dinámica de tensiones. Durante este procedimiento se definieron inicialmente los factores de funcionamiento.

$$S'_e = 0,5 \cdot S_{ult} \rightarrow S'_e = 257,5 MPa \quad (21)$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S'_e \rightarrow S_e = 117 MPa \quad (22)$$

Donde,

k_a = Factor de modificación por condición superficial $\rightarrow k_a = 0,86$

k_b = Factor de modificación por tamaño $\rightarrow k_b = 1,51 * d^{-0,157}$

k_c = Factor de modificación por carga $\rightarrow k_c = 0,59$

k_d = Factor de modificación por temperatura $\rightarrow k_d = 1$

k_e = Factor de modificación por confiabilidad $\rightarrow k_e = 0,95$

Luego, se definen los esfuerzos alternantes y medios en una situación crítica en la que el sistema de rodillos se cargue y descargue constantemente, produciendo una variación de los esfuerzos entre un valor nulo y el máximo establecido anteriormente.

Finalmente, se definen los factores de concentración de tensiones para el cambio de diámetros que tiene la sección crítica definida. Se supone un diámetro mayor del doble del pre dimensionado para realizar los cálculos y un radio de acuerdo de 1mm.

Finalmente se aplica el siguiente criterio de falla dinámico,

$$\frac{K_t \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{K_{ts} \cdot \sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \rightarrow n = 2,7 \quad (23)$$

La sección que se vincula con el reductor de velocidades está limitada a tener un diámetro de 45 mm debido a que es el diámetro del agujero de entrada al mismo. Por lo tanto se tomó la decisión de utilizar el mismo diámetro para la sección de menor dimensión.

B.4. Dimensionamiento del eje secundario.

En función del requisito de montar el eje secundario en un extremo del eje principal, se llevó a cabo un diseño preliminar para visualizar su forma y se realizaron los diagramas de esfuerzos correspondientes, ver Figura 59. Como se mencionó anteriormente el diámetro de los rodillos es de 140mm, por lo que el diámetro mínimo del eje secundario debe ser menor a dicha medida para permitir el montaje de los mismos. Los rodillos tienen un

ancho de 100mm y la sección media debe ser al menos del doble del diámetro mínimo del eje principal para asegurar la integridad estructural. Se realizó un cálculo iterativo hasta adoptar un diámetro de 50mm para la sección mínima, dado que de esta manera se realiza una verificación tanto estática como dinámica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dicho diámetro.

Para simplificar los cálculos, las cargas distribuidas ejercidas por los rodillos sobre el eje fueron modeladas como cargas puntuales.

Suponiendo que el material es isoentrópico y despreciando los pesos de los componentes se seleccionó la sección crítica como aquella que tenga un cambio de diámetro para limitar el desplazamiento de los rodillos en el sentido axial al eje.

$$\sum F = 0 \rightarrow 2 * F_{rodillos} = R_x \rightarrow R_x = 7883,3N \quad (24)$$

En base a los diagramas de esfuerzos realizados en la Figura 59, se puede ver que la sección con mayores sollicitaciones se ubica a una longitud de aproximadamente 137.5 mm, justo a la mitad del largo total, definido por el ancho de los rodillos. Sin embargo, se designará como sección crítica una sección intermedia donde se realice un cambio de diámetro para el montaje de rodamientos, dado que el cambio de diámetros es perjudicial para la vida a la fatiga como se mencionó anteriormente.

De manera estática se calcula la tensión equivalente de los esfuerzos que se aplican en dicha sección.

$$\sigma_{eq} = (\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2)^{1/2} \rightarrow \sigma_{eq} = 12MPa \quad (25)$$

$$\sigma_x = \frac{32 \cdot M_z}{\pi \cdot d^3} \rightarrow \sigma_x = 12MPa \quad (26)$$

$$\sigma_{eq} < \frac{\sigma_y}{n} \rightarrow n = 40 \quad (27)$$

Se optó por la elección del acero AISI/SAE 1045 para el eje secundario, con el propósito de mantener la uniformidad con el eje principal. La verificación de la vida a la fatiga se ejecutó siguiendo el mismo procedimiento que el empleado para el eje principal. Con-

siderando en este caso que las tensiones irán desde el valor máximo que genera la flexión hasta un mínimo nulo. Esto representaría una fluctuación constante de las fuerzas que se ejercen al peletizar cuando la materia prima queda entre los rodillos y la matriz.

$$S'_e = 0,5 \cdot S_{ult} \rightarrow S'_e = 257,5 MPa \quad (28)$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S'_e \rightarrow S_e = 138 MPa \quad (29)$$

Donde,

$$k_a = \text{Factor de modificación por condición superficial} \rightarrow k_a = 0,86$$

$$k_b = \text{Factor de modificación por tamaño} \rightarrow k_b = 1,51 * d^{-0,157}$$

$$k_c = \text{Factor de modificación por carga} \rightarrow k_c = 0,8$$

$$k_d = \text{Factor de modificación por temperatura} \rightarrow k_d = 1$$

$$k_e = \text{Factor de modificación por confiabilidad} \rightarrow k_e = 0,95$$

De manera análoga al procedimiento del eje principal se aplica el siguiente criterio de falla dinámica,

$$\frac{K_t \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{K_{ts} \cdot \sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \rightarrow n = 10 \quad (30)$$

Se tomó la decisión de utilizar un diámetro superior, de 50 mm, para utilizar rodamientos que soporten las cargas con una vida útil aceptable, teniendo en cuenta que en este análisis se desprecia el peso de los rodillos y del eje.

B.5. Selección del reductor de velocidades.

Para realizar la selección del reductor de velocidades se utilizó la relación de velocidades calculada en la sección B.2. Con esta información y verificando que el torque máximo admisible de salida sea mayor al torque necesario en la máquina se seleccionó un reductor de la marca STM, modelo RMI-130, ver Figura 60

RI 130																Kg		48
ir	$n_1 = 2800 \text{ min}^{-1}$ ▲				$n_1 = 1400 \text{ min}^{-1}$				$n_1 = 900 \text{ min}^{-1}$				$n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$				RMI	RMI...G
	n_2 min ⁻¹	T_{2M} Nm	P kW	RD %	n_2 min ⁻¹	T_{2M} Nm	P kW	RD %	n_2 min ⁻¹	T_{2M} Nm	P kW	RD %	n_2 min ⁻¹	T_{2M} Nm	P kW	RD %	IEC	
7	400	501	24	88	200	706	16.8	88	129	855	13.2	87	71	1070	9.5	84	132-112 100	—
10	280	574	19.3	87	140	791	13.3	87	90	946	10.5	85	50	1167	7.4	83		
15	187	622	14.5	84	93	840	9.8	84	60	993	7.5	83	33	1210	5.3	80		
20	140	686	12.1	83	70	915	8.1	83	45	1073	6.2	82	25	1296	4.4	77		
28	100	607	8.4	76	50	805	5.5	76	32	941	4.2	75	17.9	1131	3.1	69		
40	70	693	6.9	74	35	903	4.5	73	23	1045	3.5	71	12.5	1243	2.5	65	112-100	—
49	57	681	5.7	72	29	880	3.8	70	18.4	1014	2.8	69	10.2	1200	2.0	63		
56	50	636	4.6	72	25	814	3.1	69	16.1	935	2.3	68	8.9	1100	1.7	62		
70	40	639	3.9	69	20	812	2.5	67	12.9	928	2.0	62	7.1	1086	1.4	58		
80	35	616	3.3	68	17.5	778	2.2	64	11.3	886	1.7	60	6.3	1034	1.2	56		
100	28	551	2.5	64	14.0	691	1.7	59	9.0	785	1.3	55	5.0	913	0.94	51		

Figura 60. Reductor sin fin - corona seleccionado.

B.6. Selección de rodamientos.

La selección de los rodamientos que van montados tanto en el eje principal como el secundario se realizó a partir de los diámetros mínimos de cada eje. Para el eje secundario se seleccionaron cuatro rodamientos SKF-61910-2RS1, que irán montados sobre los rodillos. La especificación 2RS1 implica que los rodamientos incluyen un sello de los rodamientos en ambas caras laterales, lo que beneficia su aplicación en condiciones de funcionamiento en las que haya polvo en suspensión. Los dos rodamientos radiales del eje principal corresponden a la designación SKF-61916-2RZ, mientras que el rodamiento axial tiene la designación SKF-51314. A continuación, se muestra la selección de los rodamientos de las tablas del catálogo SKF, ver Figura 61, 62 y 63.

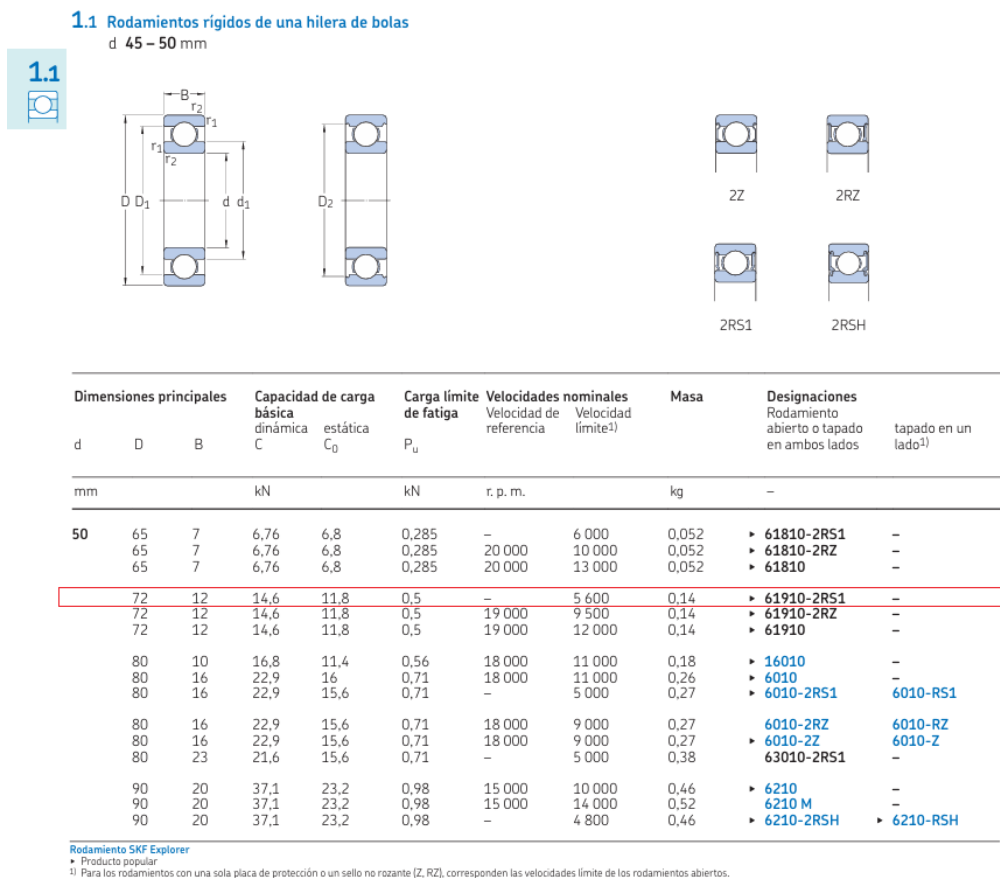
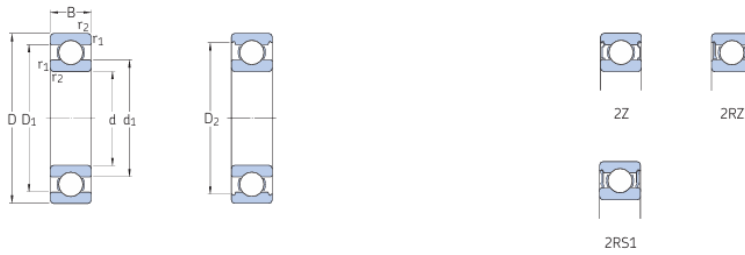


Figura 61. Rodamientos radiales del eje secundario.

1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas
d 75 – 80 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado ²⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
80	100	10	12,7	11,2	0,61	-	3 600	0,16	▶ 61816-2RS1	-
	100	10	12,7	11,2	0,61	13 000	8 000	0,15	▶ 61816	-
	110	16	25,1	20,4	1,02	-	3 400	0,4	▶ 61916-2RS1	-
	110	16	25,1	20,4	1,02	12 000	6 000	0,4	▶ 61916-2RZ	-
	110	16	25,1	20,4	1,02	12 000	7 500	0,38	▶ 61916	-
	125	14	35,1	31,5	1,32	11 000	7 000	0,61	▶ 16016	-
	125	22	49,4	40	1,66	11 000	7 000	0,86	▶ 6016	-
	125	22	49,4	40	1,66	-	3 200	0,88	▶ 6016-2RS1	6016-RS1
	125	22	49,4	40	1,66	11 000	5 600	0,89	▶ 6016-2Z	6016-Z
	140	26	72,8	55	2,2	9 500	6 000	1,45	▶ 6216	-
	140	26	72,8	55	2,2	9 500	8 500	1,7	▶ 6216 M	-
	140	26	72,8	55	2,2	-	3 000	1,5	▶ 6216-2RS1	6216-RS1

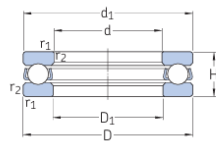
Rodamiento SKF Explorer

• Producto popular

¹⁾ Para los rodamientos con una sola placa de protección o un sello no rozante (Z, RZ), corresponden las velocidades límite de los rodamientos abiertos.

Figura 62. Rodamientos radiales del eje principal.

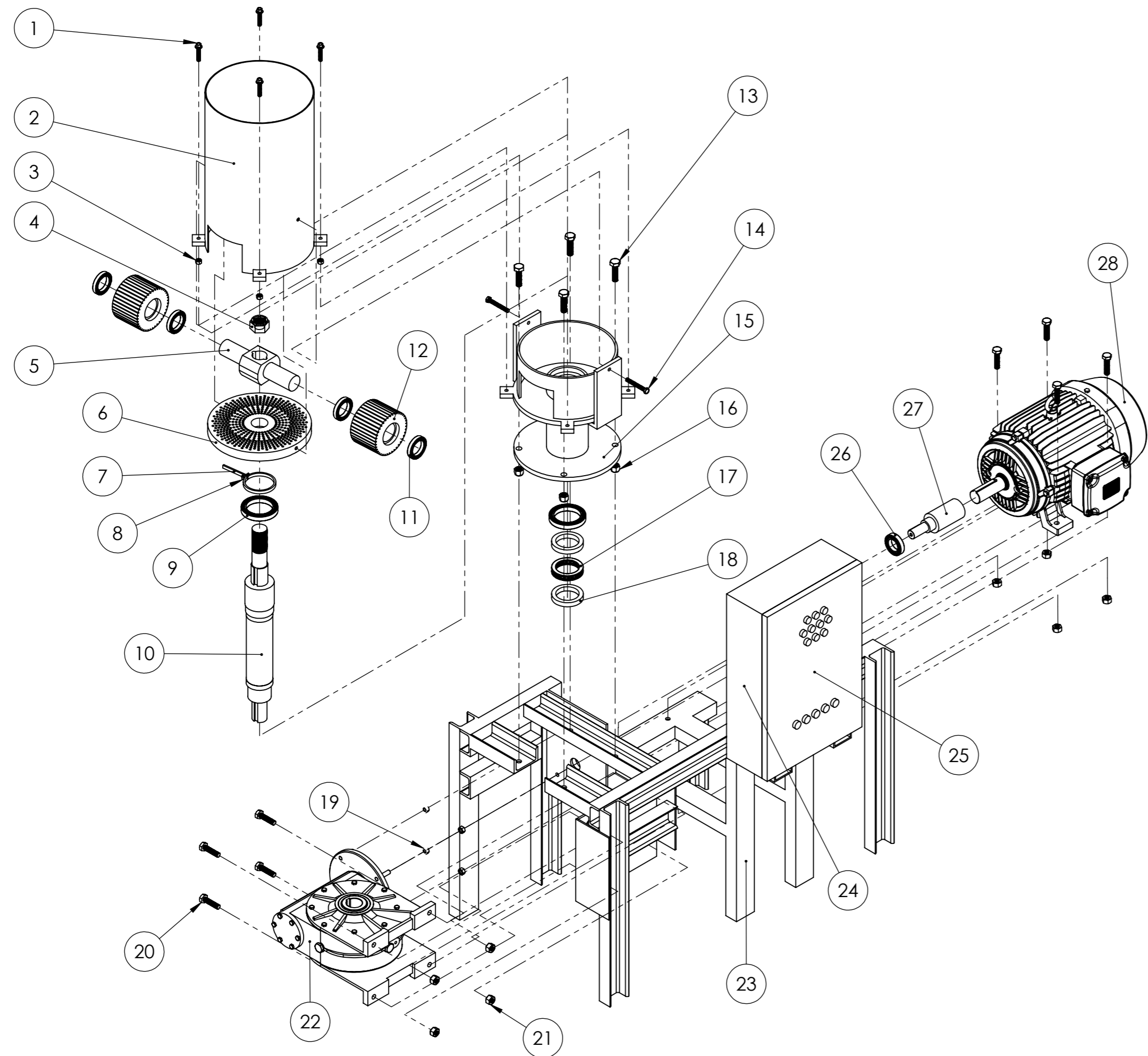
5.1 Rodamientos axiales de bolas de simple efecto
d 40 – 75 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Factor de carga mínima	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	H	dinámica C	estática C ₀	P _u	A	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	-	r. p. m.		kg	-
70	95	18	40,3	120	4,4	0,074	3 400	4 500	0,35	▶ 51114
	105	27	62,4	160	5,85	0,16	2 600	3 600	0,79	▶ 51214
	125	40	135	320	11,8	0,53	1 900	2 600	2	▶ 51314
	150	60	234	550	19,3	1,6	1 400	2 000	5	▶ 51414 M

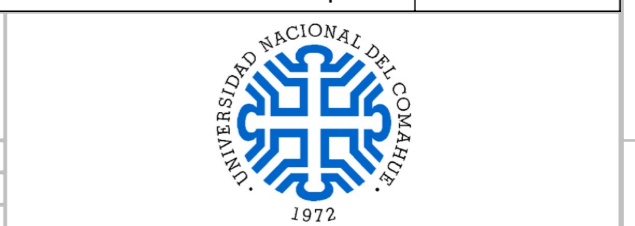
Figura 63. Rodamiento axial del eje principal.

C. Anexo III: Planos



N.º DE ELEMENTO	COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tornillo	M10x1.5x50 8.8 ISO4017	4
2	Carcasa Superior	AISI-SAE 1020	1
3	Tuerca	M10x1.5 8 ISO4032	4
4	Tuerca	W45 1.5"x12 - AISI SAE 1045	1
5	Eje Secundario	AISI-SAE 1045	1
6	Matriz	AISI-SAE 8620 (60 HRC)	1
7	Cuchilla	AISI-SAE 1020	1
8	Tornillo	M5x0.8x25 8.8 ISO4017	1
9	Rodamiento Radial	SKF-61916-2rs1	2
10	Eje Principal	AISI-SAE 1045	1
11	Rodamiento Radial	SKF-61910-2rs1	4
12	Rodillo	AISI-SAE 8620 (60 HRC)	2
13	Tornillo	M16x2.0x60 8.8 ISO4017	4
14	Tornillo	M10x1.5x80 8.8 ISO4017	2
15	Carcasa Central	AISI-SAE 1020	1
16	Tuerca	M16x2 8.8 ISO4032	4
17	Rodamiento Axial	SKF-51314	1
18	Acople Rod. Axial	AISI-SAE 1045	2
19	Tuerca	M12x10 8.8 OSP4032	4
20	Tornillo	M14x2.0x60 8.8 ISO4017	8
21	Tuerca	M14x2 8.8 ISO4032	8
22	Reductor	STM-RMI-130	1
23	Bancada	UPN80 - ASTM A36	1
24	Tablero	-	1
25	Tapa tablero	-	1
26	Rodamiento Radial	SKF-6008	1
27	Acople Motor	AISI-SAE 1045	1
28	Motor eléctrico	Baumüller 20 CV-1450 rpm	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:
 REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS



NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ. Enzo N. Perez		
VERIF.		
APROB.		

Proyecto: **Proyecto Integrador Profesional**

TÍTULO: **Máquina Peletizadora**

PESO: ESCALA:1:20 HOJA 1 DE 1