



# **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

## **DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MAQUINARIA AGRÍCOLA ADAPTADA A LAS NECESIDADES DE PEQUEÑOS PRODUCTORES**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN TECNOLOGÍA AVANZADA DE MANUFACTURA**

**PRESENTA:**

**ING. IRENE AVILA SÁNCHEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. ÁLVARO JESÚS MENDOZA JASSO**

**CODIRECTOR DE TESIS:**

**DR. FERMÍN HUGO RAMÍREZ LEYVA**

**HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, MARZO, 2026**

## **Dedicatoria**

*A mi madre, Gudulia Sánchez Landa, por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por impulsarme a seguir adelante, por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la constancia. Tu amor incondicional y tu ejemplo han sido mi mayor motivación para alcanzar esta meta.*

*A mis hermanos, Margarita, Abraham y Marianna, por acompañarme en cada paso, aun a la distancia. Gracias por creer en mí, por sus palabras de ánimo y por cada muestra de apoyo que me dio fuerza para continuar.*

*A Jazziel, por estar conmigo en cada etapa de este proceso, por motivarme día con día y recordarme que era posible, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por tu apoyo, tu paciencia y por acompañarme con cariño y confianza hasta el final.*

*A mi padre, quien, aunque físicamente ausente, permanece siempre en mi corazón. Sus enseñanzas y recuerdos me acompañan día a día y forman parte esencial de la persona que soy y de cada logro alcanzado.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco profundamente a mi madre, Gudulia, quien siempre ha creído en mí y en mis capacidades. Gracias por impulsarme en cada paso, por sus consejos, su cuidado y su cariño, que han sido mi mayor fortaleza para alcanzar esta meta.

A mi hermana Margarita, por su acompañamiento constante, por las risas y anécdotas compartidas, y por la motivación y comprensión en todo momento. A mis hermanos Abraham y Marianna, quienes, a pesar de la distancia, siempre han estado presentes; gracias por su apoyo y por recordarme, con su confianza, la importancia de esforzarme por hacer las cosas de la mejor manera posible.

A Jazziel, por estar a mi lado en los momentos más difíciles y acompañarme durante todo este camino. Gracias por su comprensión, paciencia y apoyo constante, que hicieron más llevadero este proceso.

A la Mtra. Gloria, así como a Yuridia, Jazmín, Kristal y Julieta, por su cariño incondicional y por las palabras de aliento que nunca faltaron.

A mis amigos, quienes se convirtieron en un apoyo académico y emocional, y con quienes compartí momentos significativos que hicieron de este tiempo una etapa valiosa en mi desarrollo académico y personal.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Álvaro Jesús Mendoza Jasso, por su guía durante la realización de este trabajo, así como por su apoyo, consejos y conocimientos compartidos, fundamentales para alcanzar este objetivo. Asimismo, agradezco a mi co-director de tesis, el Dr. Fermín Hugo Ramírez Leyva, por su asesoría y orientación en aspectos clave del desarrollo de la investigación.

Agradezco también a mis sinodales: el Dr. Ignacio Hernández Castillo, la Dra. Orquídea Sánchez López, el Dr. Salvador Montesinos González y el M.D.I. Fernando Iturbide Jiménez, por sus observaciones, recomendaciones y valiosos comentarios, que contribuyeron significativamente en este trabajo.

Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado mediante la beca otorgada, la cual hizo posible mi formación de posgrado y el desarrollo de este proyecto.

## RESUMEN

Esta investigación aborda necesidades de pequeños productores agrícolas de la región Mixteca de Oaxaca, particularmente en Huajuapán de León, Oaxaca, donde se identifica la escasa disponibilidad de maquinaria adecuada para su escala de producción. Esta carencia dificulta el procesamiento oportuno de las cosechas lo que genera tiempos de espera, deterioro del producto y uso de equipos no apropiados.

El objetivo fue diseñar y desarrollar un prototipo de sistema de transmisión mecánica que, con base en características de desgranadoras de maíz y picadoras de forraje existentes, permitiera el uso intercambiable en ambas máquinas mediante una fuente de energía basada en motor eléctrico. El alcance se limitó a estas dos máquinas y a la fabricación del prototipo con equipos disponibles en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

La metodología siguió una adaptación del proceso de desarrollo de producto de Ulrich y Eppinger, hasta la Fase 4 (pruebas y refinamiento), que incluyó: planeación (definición del alcance), desarrollo del concepto (levantamiento de necesidades y comparación de transmisiones), diseño a nivel sistema (arquitectura, subsistemas y ensamble), diseño de detalle (geometría, materiales, tolerancias y componentes comerciales) y evaluación del prototipo bajo condiciones representativas para identificar oportunidades de mejora. La manufactura contempló operaciones de maquinado y ensamble, incluyendo uniones roscadas y permanentes, así como procesos de conformado por eliminación de material.

El sistema se evaluó en condiciones controladas en el Laboratorio de Electrónica Avanzada con un motor trifásico de 5 hp y control mediante VDF, configurado con los parámetros nominales del motor y ajustes básicos de operación y protección. Las mediciones con tacómetro confirmaron que se alcanzaron las dos velocidades de referencia, aproximadamente 494 rpm con el VDF a 8 Hz y alrededor de 2913 rpm con 49 Hz, sin evidenciar inestabilidad ni sobrecarga. Asimismo, la incorporación de llantas, ajuste de altura y un mecanismo de desplazamiento longitudinal del motor mejoró la maniobrabilidad y la facilidad de montaje.

# ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO I. MARCO DE REFERENCIA .....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Planteamiento del problema.....	2
1.3    Justificación.....	3
1.3.1    Relevancia .....	4
1.4    Hipótesis.....	4
1.5    Objetivos.....	5
1.5.1    Objetivo general.....	5
1.5.2    Objetivos específicos .....	5
1.6    Metas.....	5
1.7    Limitaciones de la tesis .....	6
1.7.1    Tipo de investigación .....	6
1.8    Metodología .....	7
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1    Desgranadora .....	11
2.1.1    Sistemas que componen la desgranadora de maíz.....	12
2.1.2    Desgranadoras comerciales .....	13
2.2    Picadora de forraje.....	14
2.2.1    Picadoras comerciales .....	15
2.3    Tipos de transmisiones .....	16

2.3.1	Transmisión por rozamiento .....	16
2.3.2	Transmisiones por engrane.....	18
2.3.3	Árbol de transmisión.....	20
2.4	Elementos de unión .....	21
2.5	Procesos de manufactura .....	22
2.5.1	Operaciones de proceso .....	23
2.5.2	Operaciones de ensamble .....	26
2.6	Diseño de transmisiones .....	30
2.6.1	Bandas .....	30
2.6.2	Cadenas de rodillos.....	35
2.6.3	Árbol.....	36
2.7	Análisis de esfuerzos y deformaciones .....	38
2.8	Equipos de potencia y control.....	39
2.9	Diseño y desarrollo de productos.....	39
2.9.1	Despliegue de la Función de Calidad .....	40
2.9.2	Diseño para manufactura .....	42
2.9.3	Diagrama de flujo.....	42
2.9.4	Diagrama de operaciones de proceso .....	43
CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....		44
3.1	Fase 0. Planeación .....	44
3.2	Fase 1. Desarrollo del concepto.....	45
3.2.1	Identificar las necesidades del cliente .....	46
3.2.2	Necesidades organizadas en una jerarquía .....	51
3.2.3	Establecer especificaciones objetivo .....	54
3.2.4	Despliegue de la Función de Calidad .....	64
3.2.5	Generar conceptos de producto .....	68
3.2.6	Seleccionar conceptos de producto .....	72

3.2.7	Evaluación de Conceptos .....	73
3.3	Fase 2. Diseño en el nivel sistema.....	85
3.3.1	Crear un esquema del producto .....	86
3.3.2	Agrupar los elementos del esquema .....	86
3.3.3	Crear una disposición geométrica aproximada .....	88
3.3.4	Identificar las interacciones fundamentales e incidentales .....	89
3.4	Fase 3. Diseño de detalle .....	90
3.4.1	Diseño para manufactura .....	91
3.4.2	Diagrama de flujo del proceso de ensamble.....	96
3.4.3	Diagrama de operaciones del proceso.....	99
3.5	Fase 4. Pruebas y refinamiento.....	105
3.5.1	Manufactura del prototipo.....	105
3.5.2	Pruebas experimentales .....	115
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES .....		121
Referencias.....		123
APÉNDICE A. Encuesta.....		127
APÉNDICE B. Diagrama de operaciones.....		129
APÉNDICE C. Planos.....		131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso genérico de desarrollo del producto [9].....	8
Figura 2. Partes de una desgranadora de maíz [15].....	12
Figura 3. Desgranadora de maíz eléctrica RAYKEN RKDM1800W1 [15].....	14
Figura 4. Partes de una picadora de forraje [15].....	15
Figura 5. Picadora para forraje eléctrica modelo TP-800 [20].....	16
Figura 6. Transmisión mediante ruedas de fricción [22].....	17
Figura 7. Ejemplos de tipos de correas [22].....	18
Figura 8. Transmisiones dentadas [22].....	19
Figura 9. Transmisión por cadena [22].....	19
Figura 10. Transmisión por árbol [25].....	20
Figura 11. Clasificación de árboles según su misión, forma y configuración [26].....	20
Figura 12. Cuña paralela [25].....	21
Figura 13. Clasificación de los procesos de manufactura [27].....	23
Figura 14. Proceso de solidificación [27].....	24
Figura 15. Procesamiento de partículas [27].....	24
Figura 16. Procesos de deformación [27].....	25
Figura 17. Procesos de remoción de material [27].....	25
Figura 18. Procesos de soldadura [28].....	27
Figura 19. Soldadura de estado sólido [28].....	28
Figura 20. Soldadura fuerte y soldadura blanda [28].....	28
Figura 21. Unión con adhesivos [28].....	29
Figura 22. Sujeción mecánica [28].....	29
Figura 23. Transmisión de banda abierta [23].....	31
Figura 24. Transmisión de banda cruzada [23].....	32

Figura 25. Geometría básica de una transmisión por bandas [30].....	33
Figura 26. Transmisión por banda de sincronización [23].....	35
Figura 27. Acoplamiento de una cadena y una catarina [23].....	35
Figura 28. Distribución del esfuerzo cortante en una sección transversal del eje [25].....	36
Figura 29. Esquema de las cuatro fases del QFD [35]. .....	41
Figura 30. Casa de la calidad [33]. .....	42
Figura 31. Desarrollo del concepto Fase 1 [9]. .....	46
Figura 32. Matriz de necesidades-métricas. ....	56
Figura 33. Máquina picadora de forraje, utilizada para pruebas.....	57
Figura 34. Disposición de poleas en picadora de forraje. ....	58
Figura 35. Máquina desgranadora de maíz, utilizada en pruebas.....	60
Figura 36. Disposición de poleas en desgranadora de maíz.....	61
Figura 37. Adaptación de la Fase I del Despliegue de la Función de Calidad. ....	66
Figura 38. Diagrama de caja negra.....	69
Figura 39. Subfunciones de la caja negra.....	69
Figura 40. Combinación de conceptos para la transmisión adaptable a dos máquinas agrícolas. ....	70
Figura 41. Modelo Tupac M-B [39].....	76
Figura 42. Acoplamiento de fuelle ATEX [40].....	77
Figura 43. Acoplamiento de estrella ATEX [40].....	77
Figura 44. Acoplamiento flexible compacto ATEX [40].....	78
Figura 45. Acoplamiento FRC [41].....	79
Figura 46. Esquema del mecanismo de transmisión adaptable a dos máquinas agrícolas. ....	86
Figura 47. Agrupación de elementos en trozos.....	87
Figura 48. Disposición geométrica en 2D del esquema del producto. ....	89
Figura 49. Diagrama de interacción incidental. ....	90

Figura 50. Modelo entrada y salida de un sistema de manufactura.....	91
Figura 51. Modelo CAD 3D de la disposición geométrica.....	95
Figura 52. Explosionado del sistema de transmisión.....	97
Figura 53. Diagrama de ensamble de componentes para la transmisión común.....	98
Figura 54. Diagrama de operaciones del proceso para fabricación.....	100
Figura 55. Resultados de deformación, modo 1.....	102
Figura 56. Resultados de deformación, modo 2.....	102
Figura 57. Resultados de deformación, modo 3.....	103
Figura 58. Distribución de factor de seguridad.....	104
Figura 59. Proceso de corte y acabado.....	106
Figura 60. Proceso de taladrado, soldado y acabado.....	106
Figura 61. Proceso de cizallado.....	107
Figura 62. Proceso de desbaste y taladrado.....	107
Figura 63. Manufactura de bujes.....	108
Figura 64. Bujes soldados a la placa.....	108
Figura 65. Manufactura de guías laterales.....	109
Figura 66. Proceso de pintado y remachado.....	109
Figura 67. Taladrado de componente.....	110
Figura 68. Perforado de placa.....	110
Figura 69. Fabricación de la plataforma para el motor.....	111
Figura 70. Acondicionamiento del acoplamiento.....	111
Figura 71. Taladrado y roscado para tornillos prisioneros.....	112
Figura 72. Fabricación de guarda de seguridad.....	112
Figura 73. Unión de cubierta del eje de sujeción.....	113
Figura 74. Ensamble final del del prototipo.....	113
Figura 75. Fabricación de estructura de soporte.....	114
Figura 76. Fabricación de cuñero y ensamble del eje y chumaceras.....	114

Figura 77. Ensamble final del prototipo del sistema de transmisión. ....	115
Figura 78. Método de cableado del circuito de control del VDF.....	115
Figura 79. Conexiones entre componentes.....	116
Figura 80. Elementos para energizar el tablero.....	116
Figura 81. Placa de características del motor y panel de control de VDF .....	117
Figura 82. Pruebas del sistema de transmisión. ....	118
Figura 83. Resultados obtenidos de las pruebas. ....	119
Figura 84. Componentes para desplazamiento.....	120
Figura 85. Proceso de soldado y pintado. ....	120
Figura 86. Prototipo final del sistema de transmisión. ....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los principales tipos de banda [23].	30
Tabla 2. Necesidades interpretadas usuario 1.	46
Tabla 3. Necesidades interpretadas usuario 2.	48
Tabla 4. Necesidades interpretadas usuario 3.	49
Tabla 5. Jerarquía de necesidades primarias y secundarias.	51
Tabla 6. Importancia de las necesidades del cliente.	53
Tabla 7. Lista de métricas de las necesidades del cliente.	55
Tabla 8. Nomenclatura QFD.	65
Tabla 9. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por correa.	71
Tabla 10. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por cadena.	71
Tabla 11. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por engranes.	71
Tabla 12. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por árbol.	72
Tabla 13. Información para selección de conceptos.	72
Tabla 14. Concepto seleccionado para transmisión.	73
Tabla 15. Tabla comparativa de acoplamientos tipo estrella con mordazas.	81
Tabla 16. Evaluación de conceptos.	81
Tabla 17. Tabla comparativa de bases para motor.	83
Tabla 18. Evaluación de conceptos para la base del motor.	84
Tabla 19. Tabla comparativa de materiales candidatos.	92
Tabla 20. Lista de componentes para la base del motor y acople.	93
Tabla 21. Lista de componentes para el sistema de control.	96
Tabla 22. Tabla de parámetros de función modificados.	117

---

# CAPÍTULO I. MARCO DE REFERENCIA

---

## 1.1 Introducción

Durante el segundo trimestre de 2023, la fuerza laboral de los trabajadores agrícolas en México fue de 2.97 millones de personas, con un salario promedio de \$2,610 trabajando alrededor de 37.1 horas a la semana. La fuerza laboral se distribuyó en 88.4% hombres con un salario promedio de \$2,510 y 11.6% mujeres con un salario promedio de \$3,390. Los mejores salarios promedio percibidos por los trabajadores agrícolas se dieron en Baja California Sur, Sinaloa y Michoacán de Ocampo [1]. Esto contrasta con datos del año 2015 que, de acuerdo con datos proporcionados por INEGI en México, la población ocupada en actividades agrícolas era de 5.5 millones de personas, de las cuales el 56% fueron agricultores y el 44% eran trabajadores agrícolas de apoyo. De estos ocupados, solo el 11% eran mujeres. Las entidades de Chiapas, Guerrero, Michoacán de Ocampo, Oaxaca, Puebla y Veracruz de Ignacio de la Llave concentraron el 58.7% de estos ocupados en el país [2].

El presente trabajo de tesis se enfoca en abordar las necesidades de la región Mixteca baja oaxaqueña, específicamente en Huajuapán de León, reconocida por su destacada producción agrícola, en donde en el año 2023, entre las ocupaciones con mayor cantidad de trabajadores en esta región, se destacaron aquellos dedicados al cultivo de maíz y/o frijol, con un total de 520,000 trabajadores, así como los trabajadores de apoyo en actividades agrícolas, que sumaron 380,000 empleados [3]. En este contexto, se identifica la persistente problemática que enfrentan numerosos productores minoristas, quienes se encuentran inmersos en dificultades para mejorar sus procesos manuales de producción. La brigada de Promoción al Desarrollo de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) ha identificado esta problemática, evidenciando limitaciones en cuanto a equipos, recursos y apoyo destinado a estos productores, agravados por la migración hacia Estados Unidos, un fenómeno que ha impactado directamente en la mano de obra y el desarrollo de las actividades agrícolas.

Si bien existe maquinaria disponible para llevar a cabo actividades agrícolas similares a las que desarrollan estos productores, estos equipos exceden las necesidades de la escala de producción de los pequeños agricultores y ganaderos. Esto ha generado la urgente demanda de diseñar y desarrollar equipos apropiados para una escala más reducida, capaces de satisfacer las particularidades y limitaciones de los productores minoristas, ya que no resulta viable poseer maquinaria cuya capacidad no se ajuste a las necesidades reales de los pequeños productores.

La agricultura a pequeña escala, también conocida como agricultura familiar, tiene una importancia fundamental en América Latina y el Caribe debido a su impacto positivo en

múltiples dimensiones socioeconómicas y ambientales. Este tipo de agricultura está estrechamente vinculada con la seguridad alimentaria, ya que produce una gran parte de los alimentos consumidos en la región, especialmente aquellos de carácter tradicional. Desde una perspectiva ambiental, la agricultura familiar promueve el uso sostenible de los recursos naturales y la conservación de la biodiversidad agrícola, al emplear prácticas más diversificadas y adaptadas a los ecosistemas locales [4].

Es por ello que esta investigación de tesis se enfoca en abordar estas necesidades específicas dentro del ámbito agrícola, a través del diseño y desarrollo de un sistema de transmisión adaptable para ser implementada en al menos dos máquinas agrícolas destinadas a una escala de producción pequeña. Este enfoque busca no solo optimizar la producción, sino también fomentar la viabilidad económica y la sostenibilidad de las actividades agrícolas a nivel local.

La investigación aborda el montaje subsecuente de una desgranadora de maíz, así como de una picadora de forraje con el fin de evaluar la posibilidad de integrar a ambas máquinas un mecanismo de transmisión única capaz de recibir potencia a partir de una misma fuente en sus modos de trabajo.

La desgranadora de maíz es una máquina utilizada en el campo para separar los granos de maíz de la mazorca sin dañarlos, permitiendo su almacenamiento, venta o procesamiento posterior. Puede ser operada manualmente, con motor eléctrico o de combustión interna, y consta de una tolva, sistemas de engranajes, sistema de accionamiento y conducción de salida para los granos separados. La disponibilidad de desgranadoras adaptadas a las necesidades de los pequeños productores es esencial para mejorar la productividad y rentabilidad de sus actividades agrícolas [5].

Por otro lado, una picadora de forraje es una máquina agrícola esencial en la producción ganadera, encargada de triturar y cortar variedad de cultivos, como maíz, hierba y sorgo, para facilitar su almacenamiento y la nutrición animal. Sus beneficios incluyen la optimización del tiempo y recursos en las labores agrícolas, así como la maximización del aprovechamiento de recursos forrajeros disponibles [6].

La finalidad de este desarrollo es proponer un sistema capaz de resolver dos retos de relevancia actual con el enfoque de convertirlo en un mecanismo que pueda replicarse en el sector agrícola, permitiendo incrementar la efectividad de los diversos dispositivos en el campo y así poder aprovechar eficientemente la misma fuente de energía.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la región Mixteca, los pequeños productores enfrentan dificultades significativas al procesar sus cosechas debido a la carencia de maquinaria agrícola adecuada para sus

necesidades específicas. Las máquinas disponibles en el mercado están diseñadas para grandes producciones, resultando en una capacidad excesiva para los productores de menor escala. Este exceso de capacidad conlleva a costos inaccesibles para estos productores, lo que los obliga a buscar alternativas como la renta de equipos grandes.

Este problema se agrava por las consecuencias que enfrentan los pequeños productores al utilizar maquinaria de gran tamaño mediante alquileres, incluyendo tiempos de espera ya que están a expensas de la disponibilidad de maquinaria, lo cual, en muchos casos, conlleva deterioro de los productos cosechados y en consecuencia la pérdida de la cosecha debido a la espera, lo que resulta costoso e ineficiente. Además, la inestabilidad climática y la temporalidad de las lluvias afectan el proceso de desgranado de maíz, ya que un exceso de humedad en los granos dificulta el desgranado y puede llevar a la pérdida de la cosecha. La inversión en máquinas grandes o en alquileres costosos representa un desafío financiero significativo para los pequeños productores, impactando negativamente en sus ingresos.

Teniendo en cuenta las dificultades mencionadas, uno de los problemas más significativos en la maquinaria agrícola se evidencia en el considerable costo que conlleva la adquisición de equipos especializados capaces de realizar únicamente una tarea específica. Además, cada una de estas máquinas requiere un motor propio para llevar a cabo su función, lo que incrementa aún más los costos asociados. Esta situación resulta especialmente desventajosa para los pequeños productores, quienes enfrentan dificultades financieras significativas al tener que invertir en múltiples equipos con motores individuales. La falta de versatilidad y la necesidad de múltiples motores hacen que esta opción sea poco costosa y poco práctica para este sector.

Formulación de la pregunta de investigación:

¿Es posible implementar una misma fuente de potencia para operar dos diferentes máquinas agrícolas mediante el diseño y desarrollo de un sistema de transmisión adaptable que garantice compatibilidad y mejora del desempeño?

### **1.3 Justificación**

En la actualidad, se encuentran disponibles una amplia variedad de implementos diseñados para tractores que pueden ser accionados mediante una sola toma de fuerza. Estos incluyen desde molinos y cosechadoras hasta sembradoras, cortadoras y desgranadoras, entre otros [7]. Sin embargo, es importante destacar que estos implementos suelen ser utilizados en actividades agrícolas a gran escala, donde se requieren maquinarias de gran tamaño para llevar a cabo estas tareas de manera eficiente. A pesar del continuo desarrollo de nuevos implementos en el sector agrícola, resulta

notable que estos no suelen comercializarse para maquinaria de menor capacidad, lo que limita la posibilidad de utilizar más de una máquina con la misma toma de fuerza en entornos de producción más pequeños.

### **1.3.1 Relevancia**

El desarrollo de una transmisión común que pueda ser usada tanto por una máquina desgranadora como por una máquina picadora de forraje, surge de la necesidad de brindar una solución eficaz a los pequeños productores agrícolas que carecen de maquinaria adecuada para el proceso de desgranado y picado. Esta ausencia de desgranadoras y picadoras diseñadas para las necesidades específicas de los pequeños productores representa una problemática constante, las máquinas existentes son costosas y están sobradas en capacidad, lo que implica una inversión inaccesible para este sector, llevándolos a depender de terceros que ofrecen la renta de maquinaria. Por tanto, el diseño de un sistema de transmisión de máquina adaptada será fundamental para suplir esta carencia y ofrecer una alternativa viable y accesible.

Al desarrollar un sistema de transmisión que pueda ser implementada en dos máquinas agrícolas, se puede reducir la necesidad de adquirir un motor para cada una de ellas. Este enfoque se presenta como un medio efectivo para reducir los gastos adicionales asociados con la compra de múltiples motores. Al utilizar una misma transmisión y fuente de potencia para varias máquinas, se maximiza la utilidad del motor adquirido, lo que resulta en un ahorro significativo de recursos para los agricultores. Así mismo, optimizar el funcionamiento de las máquinas desgranadoras y picadoras, ayudará a maximizar el rendimiento de las cosechas y a minimizar las pérdidas durante el procesamiento.

La meta es abordar dos de las principales actividades en la agricultura: el desgrane de maíz y el picado de forraje, con el fin de lograr una mejora en la multifuncionalidad, eficiencia y costo de estas operaciones. Este enfoque busca proporcionar a los productores una herramienta que les permita optimizar su capacidad de procesamiento de cultivos, incrementar sus ganancias y, en última instancia, fomentar su desarrollo económico y social.

## **1.4 Hipótesis**

Al diseñar un sistema de transmisión mecánica intercambiable y adaptable para operar en dos máquinas agrícolas distintas, se posibilita el uso de un solo motor y la implementación de ajustes que respondan a variaciones en los modos de trabajo.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de sistema de transmisión mecánica considerando las características de las máquinas desgranadoras y picadoras existentes para permitir su uso intercambiable en ambas máquinas del sector agrícola.

1.5.2 Objetivos específicos	1.6 Metas
OE1: Realizar un análisis de las necesidades y requerimientos en la actividad de desgranado y picado mediante una encuesta a pequeños productores locales para definir los requerimientos de diseño de una desgranadora y picadora.	M1: Información sobre las necesidades y limitaciones de los pequeños productores locales en cuanto a una máquina desgranadora y una máquina picadora.  M2: Estado de la tecnología mediante una revisión bibliográfica y de campo, visitando a distribuidores de maquinaria agrícola, para complementar la información obtenida de la encuesta realizada.
OE2: Diseñar el sistema de transmisión considerando diversas propuestas para que pueda ser adaptada tanto a una máquina desgranadora como a una máquina picadora.	M3: Conceptos de diseño que funcionen tanto para una desgranadora como para una picadora.  M4: Diseño detallado del sistema de transmisión, especificando velocidad y potencia requeridas.
OE3: Seleccionar los materiales y componentes necesarios mediante la consulta en catálogos y con proveedores.	M5: Piezas que se fabricarán y aquellas que se comprarán, para la construcción de la transmisión, considerando criterios de resistencia, durabilidad, disponibilidad local, costo y uso de maquinaria y equipo del Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura y Metales.
OE4: Planear los procesos de manufactura y ensamblaje de los elementos requeridos, para establecer una secuencia lógica.	M6: Diagrama de flujo de proceso, para representar las etapas y secuencias de operaciones

OE5: Fabricar un prototipo funcional del sistema de transmisión, utilizando los materiales y componentes seleccionados previamente para evaluar el funcionamiento.	M7: Evaluación del funcionamiento y la compatibilidad prototipo de acuerdo con los parámetros requeridos para accionar las máquinas.
--	--

## 1.7 Limitaciones de la tesis

Para este estudio, se limitó el análisis a la desgranadora de maíz y una picadora de forraje con el objetivo de diseñar un sistema de transmisión adecuada que permita el funcionamiento óptimo de ambas máquinas impulsadas por una transmisión común. Esta limitación implica que se enfocó exclusivamente en la interacción y adaptación de la transmisión para estas dos máquinas agrícolas específicas, dejando de lado consideraciones sobre otros tipos de maquinaria agrícola.

La fuente de energía se restringe a un motor eléctrico.

La construcción del prototipo de prueba se llevó a cabo utilizando exclusivamente las máquinas y equipos disponibles en el Laboratorio de Manufactura Avanzada y taller de Metales de la UTM.

### 1.7.1 Tipo de investigación

Existen dos tipos de enfoques de investigación, el enfoque cualitativo, que utiliza la recolección de datos sin medición numérica para describir o afinar preguntas de investigación, se orienta a profundizar en casos específicos y no a generalizar. Y el enfoque cuantitativo que usa la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento y probar teorías [8].

En este trabajo de investigación se tiene un enfoque cuantitativo ya que la naturaleza de la investigación implica la recopilación de datos cuantitativos para evaluar y validar la efectividad del prototipo desarrollado.

Sin embargo, a pesar de que la investigación principal es de tipo cuantitativo, también abarca algunos aspectos cualitativos involucrados en el proceso de diseño y desarrollo, como la realización de entrevistas cualitativas con los pequeños productores agrícolas para comprender mejor sus necesidades y preferencias en términos de funcionamiento de la maquinaria agrícola. Estas entrevistas proporcionan información importante que

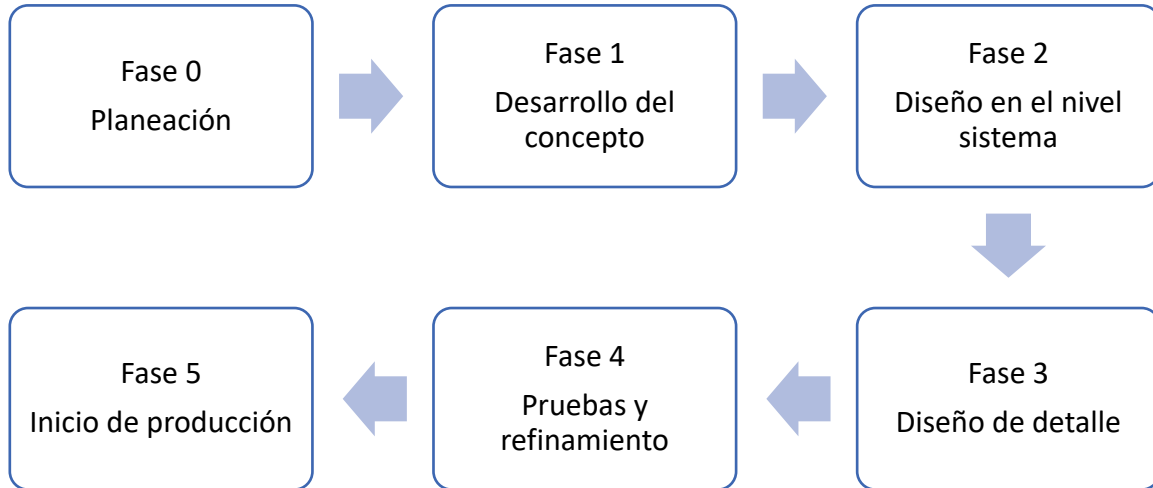
complemente los datos cuantitativos recopilados durante el proceso de diseño y desarrollo del prototipo.

Esta investigación se considera aplicada, ya que se enfoca en aplicar los conocimientos existentes para solucionar problemas específicos y se caracteriza por la creación de nuevos productos o tecnologías, o la mejora de los ya existentes, mediante procesos de diseño, desarrollo, y pruebas [8]. En este caso se pretende mejorar el desempeño de la transmisión de una máquina agrícola y se implementa la multifuncionalidad, para que una misma transmisión pueda ser utilizada en dos máquinas.

La naturaleza aplicada de la investigación se evidencia en su enfoque práctico y orientado a la solución de problemas concretos, buscando resultados que tengan una aplicación directa y beneficiosa para el sector agrícola específico al que se dirige. La metodología incluye el diseño de ingeniería, el análisis de requisitos, la selección de materiales, la fabricación de prototipos, y las pruebas de campo, lo cual está alineado con los objetivos de la investigación aplicada.

## **1.8 Metodología**

En el presente trabajo de investigación se empleó una adaptación de la metodología propuesta por Ulrich y Eppinger (Figura 1). El proceso genérico de desarrollo del producto consta de seis fases, que van desde la planeación hasta el lanzamiento del producto en el mercado. Se inicia con la fase de planeación, donde se estableció la misión del proyecto, luego, se avanza a la fase de investigación del concepto, seguida por el diseño a nivel sistema y el diseño de detalle. Posteriormente, se lleva a cabo la fase de pruebas y refinamiento, donde se evaluaron prototipos del producto, finalmente, se llega a la fase de inicio de producción, donde se fabricó el producto utilizando el sistema de producción previsto. En este caso solamente se aborda hasta la fase 4, que es pruebas y refinamiento [9].



*Figura 1. Proceso genérico de desarrollo del producto [9].*

### **Fase 0: Planeación**

La actividad de planeación comienza con la identificación de oportunidades de productos, seguido por un análisis en la planeación del producto. Esta etapa abordó la investigación del estado del arte, y la identificación de los productos existentes en el mercado, en cuanto a máquinas desgranadoras de maíz y picadoras de forraje. Así mismo se definieron los objetivos, metas y limitaciones de la investigación.

### **Fase 1: Desarrollo del concepto**

El proceso de desarrollo de concepto implicó una serie de actividades fundamentales, en donde se identificaron las necesidades del cliente. En la etapa inicial del desarrollo de concepto, se llevó a cabo una visita a agricultores ubicados en zonas cercanas a Huajuapán de León, con el objetivo de comprender a fondo las necesidades específicas en cuanto a funcionalidad y características de las máquinas agrícolas en cuestión. Durante estas visitas, se realizó un diálogo directo con los agricultores para obtener una perspectiva detallada de sus requerimientos y desafíos en el campo. Además, se llevó a cabo un análisis detallado de las transmisiones utilizadas en las máquinas desgranadoras y picadoras actualmente en uso, con el fin de comparar capacidades de trabajo, rendimiento del motor y otros aspectos relevantes. Se evaluaron también los precios asociados a la adquisición de los componentes que conforman la transmisión de dichas máquinas, con el objetivo de identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir costos en el desarrollo de este proyecto. Se propusieron conceptos de transmisiones y se escogió uno para su desarrollo con las demás fases.

## **Fase 2: Diseño en el nivel sistema**

La etapa de diseño a nivel sistema implicó la definición de la arquitectura del producto, su descomposición en subsistemas y componentes, así como la planificación inicial del proceso de manufactura y el esquema de ensamblaje final. En esta etapa se estableció la estructura general y los componentes principales de la transmisión, identificando subsistemas, sus funciones y relaciones entre sí. Se elaboró un diseño que incluye las dimensiones y características básicas de la transmisión, considerando las necesidades y especificaciones de las máquinas a las que estará adaptada. Posteriormente se realizó una primera planificación de cómo se llevó a cabo la elaboración de la transmisión, así como el proceso de ensamblaje final de los diferentes componentes.

## **Fase 3: Diseño de detalle**

La fase de diseño detallado implicó la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto, así como la identificación de las partes estándar a adquirir. En esta fase se detallaron las características específicas de cada componente de la transmisión, incluyendo su forma, tamaño y material de construcción para garantizar su correcto funcionamiento, también se determinaron aquellas piezas que son adquiridas como estándar en el mercado, lo que facilita la adquisición y reduce los tiempos de fabricación.

Al final se generó documentación que incluye dibujos o archivos describiendo la geometría de cada pieza, especificaciones de las partes compradas, y planes de proceso para la fabricación y ensamblaje.

## **Fase 4: Pruebas y refinamiento**

La fase de pruebas y refinamiento implicó la construcción y evaluación de distintas versiones preliminares del producto. En esta última etapa se procedió a la fabricación del sistema de transmisión, diseñado para evaluar el comportamiento de la transmisión y componentes bajo condiciones operativas representativas de las máquinas agrícolas en estudio. Dicho sistema de transmisión fue sometido a pruebas y evaluaciones técnicas para verificar su funcionamiento y validar el cumplimiento de los requisitos establecidos. Esta fase permitió verificar su funcionamiento e identificar posibles fallos y mejoras, integrar adecuadamente los componentes y funcionalidades, y asegurar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el desarrollo del producto.

Conforme a la clasificación de procesos de manufactura, se planeó ejecutar operaciones de ensamblaje, incluyendo el ensamble mecánico a través de elementos de fijación roscados

y técnicas de unión permanente [10]. Además, en lo que respecta a las operaciones de procesamiento, se consideró la aplicación de procesos de formado, tales como la eliminación de material y operaciones de procesamiento de superficies.

---

## **CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

---

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el diseño y desarrollo del prototipo. Se describen las máquinas de referencia y sus condiciones de operación, así como los principios de transmisión de potencia y movimiento, los tipos de transmisión y los elementos asociados (cuñas, acoplamientos, bandas, cadenas y árbol), junto con criterios generales de selección. Asimismo, se incluyen consideraciones de manufactura para la fabricación y ensamble del prototipo, bases de análisis de esfuerzos y deformaciones, y los equipos de potencia y control empleados. Finalmente, se presenta una adaptación del despliegue de la función de calidad (QFD) para traducir necesidades del usuario en especificaciones técnicas.

En México, una proporción significativa de la población participa en actividades agrícolas, principalmente en unidades de pequeña escala. Se estima que 34% de la población realiza tareas agrícolas y que la mayoría de los productores dispone de superficies reducidas, 85% cuenta con hasta 5 ha cultivables y 90% no supera 3 ha. Esta estructura productiva incrementa la demanda de maquinaria ligera y adaptable, capaz de operar en espacios limitados y con restricciones económicas [11].

El uso de maquinaria agrícola contribuye a mejorar la eficiencia de las labores del campo, al facilitar operaciones como preparación del suelo, siembra, manejo del cultivo, cosecha y acondicionamiento [12]. Además de sus componentes mecánicos, su aprovechamiento requiere criterios de selección, operación, mantenimiento y administración para reducir fallas, costos y riesgos durante el servicio. Bajo este enfoque, se presentan conceptos generales de maquinaria y mecanización, así como criterios de operación, que sustentan el diseño y la evaluación de soluciones orientadas a incrementar el desempeño y la adaptabilidad de equipos en el sector agrícola.

### **2.1 Desgranadora**

Una desgranadora de maíz (Figura 2) es una máquina diseñada para separar los granos de maíz de la mazorca de forma eficiente, facilitando el proceso de recolección y aumentando la productividad agrícola [13].

Se distinguen dos tipos de desgranadoras: las que se conectan comúnmente a la toma de fuerza del tractor, usadas para grandes producciones, y aquellas que funcionan mayoritariamente con motores externos, ya sean eléctricos o de combustión, usadas en producciones más reducidas y que, sin embargo, su uso resulta costoso para pequeños productores. Estas máquinas mecanizan el proceso a través del movimiento de engranajes y piezas accionados por motores eléctricos o a gasolina [14].



*Figura 2. Partes de una desgranadora de maíz [15].*

El proceso inicia al encender la máquina, donde un sistema de transmisión por bandas o cadenas permite el funcionamiento del mecanismo, la tolva se llena con grandes cantidades de maíz, que caen sobre un cilindro con aletas radiales para desgranarlos por impacto, los granos resultantes caen sobre una criba que separa el grano de la mazorca para su recolección. Al final del cilindro, los olotes son expulsados por un ventilador [5].

## **2.1.1 Sistemas que componen la desgranadora de maíz**

### **2.1.1.1 Sistema de alimentación**

Las tolvas son componentes de ciertos tipos de maquinaria que tienen la función de almacenar y dirigir materiales para su traslado a otro lugar. Por lo general, tienen una forma cónica con paredes inclinadas, similar a un cono, lo que permite la carga desde la parte superior y la descarga a través de una salida o compuerta en la parte inferior.

### **2.1.1.2 Sistema de desgranado**

**Cilindro desgranador dentado:** es de tambor abierto con cuatro frentes y batidores dispuestos en posición opuesta. Está equipado con marcos de hierro fundido en el eje y cada barra escofina cuenta con dientes de metal. Al pasar los materiales por el tamiz de

agitación en el cóncavo, se produce la separación entre la mazorca y el grano quebrado. Los granos que pasan a través del tamiz de peldaño son separados de los desechos mediante un aspirador. Los granos se limpian al caer a través del enchufe principal para su recolección.

**Cilindro desgranador con dados desgranadores:** las desgranadoras accionadas por motores cuentan con un sistema de cilindros desgranadores rotativos, los cuales están equipados con dientes de espiga de metal dispuestos en forma de espiral, el cilindro desgranador tiene la función de contener todos los dados desgranadores, los cuales están soldados. Para facilitar un rápido desgrane y transporte del olote al exterior, los dados deben estar dispuestos en un recorrido en espiral alrededor del cilindro.

### 2.1.1.3 Sistema de transmisión de potencia

El sistema de transmisión de potencia de una desgranadora de maíz es esencial para su funcionamiento eficiente, ya que se encarga de transferir la potencia desde una fuente de energía, como un motor, hacia los componentes responsables del desgranado y procesamiento del maíz. Los elementos típicos de este sistema incluyen el motor, que es la fuente principal de energía que impulsa la desgranadora y puede ser eléctrico, de combustión interna o manual en configuraciones simples, el embrague, utilizado en algunos casos para conectar o desconectar el motor de la transmisión de potencia sin afectar todo el sistema, y la transmisión de potencia, que puede ser directa o a través de correas, cadenas o engranajes, dependiendo del diseño específico de la desgranadora, llevando la potencia del motor a componentes clave como el tambor desgranador y los mecanismos de alimentación y descarga. Una forma eficiente de transmitir esta potencia es mediante el movimiento rotatorio de un eje, el cual está soportado por cojinetes. Para lograr cambios en la velocidad y el par de torsión entre ejes, se pueden emplear engranajes, bandas, poleas o catarinas de cadena [16].

### 2.1.2 Desgranadoras comerciales

En el mercado existen múltiples modelos de desgranadoras que difieren en fuente de potencia (gasolina o eléctrico), capacidad, dimensiones, peso y tipo de transmisión. En este apartado se presentan únicamente dos modelos comerciales representativos, seleccionados por su disponibilidad en el mercado objetivo y por cubrir configuraciones típicas de accionamiento (motor a gasolina y motor eléctrico), con el fin de establecer parámetros de referencia para el análisis del sistema de transmisión.

Como primer ejemplo, se analiza la desgranadora RAYKEN RKDM1800-RLM65 (Figura 2), cuenta con motor de gasolina de 4 tiempos marca Swedish Husky Power® y potencia de

6.5 hp, tiene una capacidad de procesamiento de hasta 1000 kg/h, las dimensiones de la máquina son de 50 x 135 x 135 cm y tiene un peso de 65 kg [15]. La mayoría de las máquinas desgranadoras utilizan la transmisión de bandas en V. Las desgranadoras de gasolina comerciales utilizan motores desde 4 hp y tienen precios desde \$10,755 [15], [17].

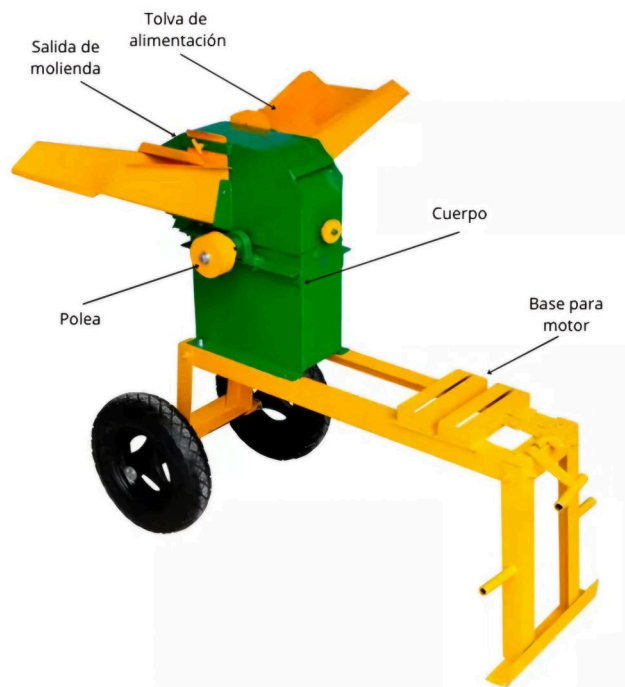
Por otra parte, en la categoría de desgranadoras eléctricas, se considera el modelo RAYKEN RKDM1800–RKDM1800W1 (Figura 3), se acciona con un motor eléctrico marca WEG® de 1 hp, utiliza un voltaje 127/220 V, tiene una capacidad de procesamiento de hasta 1000 kg/h, las dimensiones de la máquina son de 63 x 112 x 91 cm y tiene un peso de 83 kg [15]. Las desgranadoras eléctricas comerciales utilizan motores desde 1 hp y tienen precios desde \$11,479 [15], [17].



*Figura 3. Desgranadora de maíz eléctrica RAYKEN RKDM1800W1 [15].*

## **2.2 Picadora de forraje**

La picadora de forrajes es una máquina agrícola esencial para convertir en pequeñas partículas diversas especies de plantas destinadas a la alimentación del ganado. Compuesta por una estructura metálica, la picadora opera mediante un motor eléctrico o de combustión interna, habitualmente a gasolina, que activa un eje dotado de cuchillas para triturar el material entrante (Figura 4) [18]. Estas máquinas al igual que las desgranadoras, mecanizan el proceso a través del movimiento de engranajes y piezas accionados por motores eléctricos o a gasolina.



*Figura 4. Partes de una picadora de forraje [15].*

### **2.2.1 Picadoras comerciales**

La oferta comercial de desgranadoras es diversa y presenta variaciones en el tipo de energía (gasolina o electricidad), capacidad de trabajo, dimensiones, peso y tipo de transmisión. Para efectos de este estudio se consideran dos equipos comerciales como referencia, elegidos por su disponibilidad y por representar configuraciones típicas de accionamiento.

Como caso representativo de picadoras a gasolina, se considera la picadora de forraje RAYKEN RKP1800-RE65 (Figura 4), utiliza un motor de gasolina marca Swedish Husky Power® y potencia de 6.5 hp, tiene una capacidad de procesamiento de hasta 700 kg/h, las dimensiones de la máquina son de 120 x 110 x 50 cm y tiene un peso de 70 kg. Esta picadora utiliza la transmisión de bandas en V. En picadoras de forraje comerciales de gasolina se encuentran precios desde \$7,985 y motores desde 6.5 hp [18], [15], [19].

En cuanto alternativa con accionamiento eléctrico, se presenta la picadora para forraje modelo TP-800 (Figura 5), se acciona con un motor eléctrico Weg de 1.5 hp, es monofásico de 127/220 V, tiene un rendimiento de 250 kg/h, las dimensiones son 110 x 88 x 108 cm y tiene un peso de 80 kg [20]. Las picadoras eléctricas utilizan motores desde 1.5 hp [17], [20].



*Figura 5. Picadora para forraje eléctrica modelo TP-800 [20].*

A partir de estas referencias comerciales, se identifica que la transmisión es un elemento clave para adecuar la potencia y la velocidad del motor a las necesidades del proceso. Por ello, en el siguiente apartado se describen los principales tipos de transmisiones mecánicas y sus características.

## **2.3 Tipos de transmisiones**

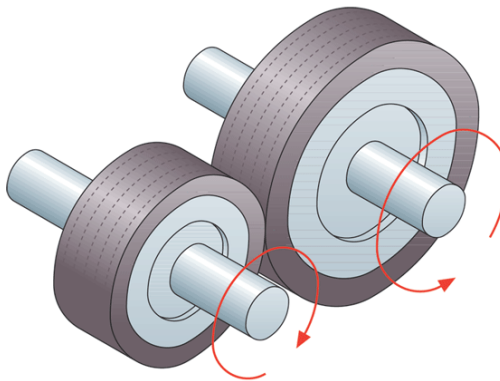
Las transmisiones mecánicas son mecanismos que se utilizan para transferir energía mecánica desde una máquina o elemento motor a los componentes de trabajo de otra máquina, permitiendo alteraciones en las velocidades, fuerzas o momentos. Estas transmisiones son fundamentales en la arquitectura de las máquinas, ya que permiten adaptar la potencia y dirección del movimiento proveniente de una fuente de energía a las necesidades específicas de cada componente de trabajo[21]. Estas se pueden dividir en transmisiones por rozamiento y transmisiones por engranaje, las cuáles se explican a continuación.

### **2.3.1 Transmisión por rozamiento**

Las transmisiones por rozamiento hacen uso de fenómenos de atrición entre superficies en contacto para transferir movimiento. Pueden ser susceptibles a deslizamientos, ruido y vibraciones, por lo que requieren lubricación y mantenimiento adecuados [22].

### 2.3.1.1 Transmisiones por fricción

En este tipo de transmisiones el movimiento se efectúa mediante la fuerza de fricción entre dos superficies en contacto (Figura 6). Estas transmisiones tienden a utilizarse más ampliamente cuando se desea transmitir bajas potencias, debido a que presentan limitaciones en cuanto a la estabilidad y exactitud de la transmisión de movimiento [22].



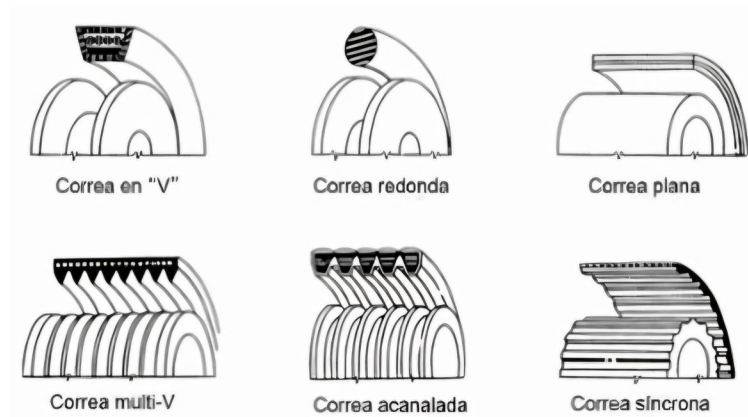
*Figura 6. Transmisión mediante ruedas de fricción [22].*

### 2.3.1.2 Transmisiones por correa

Las transmisiones por correa son un tipo de transmisión de potencia que permite transferir energía mecánica entre ejes, reducir velocidades y mitigar impactos y vibraciones gracias a la elasticidad de las correas. Existe una variedad de tipos de correas (Figura 7), como planas, en V, multiranuradas, de sección redonda y de sección cuadrada, cada una adaptada a diferentes situaciones y condiciones de trabajo.

Normalmente, es necesario tensar la correa para su correcto funcionamiento, lo que se puede lograr mediante diversos métodos, como el uso de rodillos tensores o desplazamiento de una polea con respecto a la otra. La tensión adecuada es crucial para evitar deslizamientos, ruido excesivo y desgaste prematuro de las correas y poleas.

Debido a su simplicidad, bajo costo y ausencia de lubricación, las transmisiones por correa son populares en aplicaciones donde se busca una alternativa fiable y económica para transferir potencia y movimiento entre ejes, especialmente en equipos que requieren reducir velocidades y absorber choques y vibraciones [22].



*Figura 7. Ejemplos de tipos de correas [22].*

## 2.3.2 Transmisiones por engrane

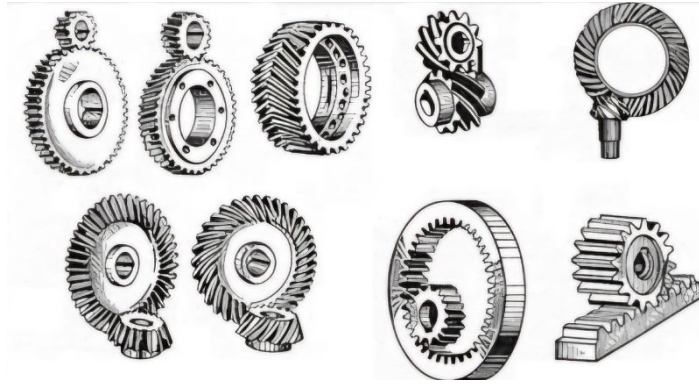
Las transmisiones por engrane se caracterizan por proporcionar una relación de transmisión constante y precisa, lo que permite un control exacto de la velocidad y el par entre el elemento motriz y el elemento conducido [23].

### 2.3.2.1 Transmisión por ruedas dentadas

Es un sistema de transmisión de movimiento que transfiere potencia entre ejes mediante el contacto diente a diente de dos ruedas dentadas, una motriz (piñón) y otra conducida (rueda o corona).

El movimiento se origina por la presión de los dientes del piñón contra los de la rueda, lo que impulsa la potencia desde un árbol conductor al conducido. La resistencia de contacto entre los dientes conjugados debe ser suficiente para transmitir la potencia a través de la raíz de los dientes, los núcleos y los cubos hasta llegar a los elementos de acople con los ejes.

Además de ofrecer una elevada capacidad para transmitir grandes potencias y torques junto con un rendimiento óptimo, las transmisiones por ruedas dentadas (Figura 8) encuentran beneficios en su disposición compacta, ideal para lugares reducidos. Sin embargo, enfrentan desafíos tales como un costo inicial mayor y la tendencia a generar más ruido y vibraciones en comparación con las transmisiones por correa y poleas [22].

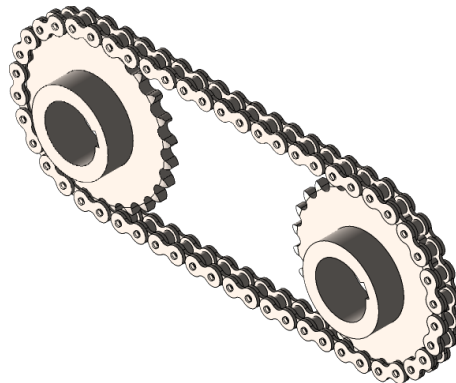


*Figura 8. Transmisiones dentadas [22].*

### 2.3.2.2 Transmisión por cadena

Las transmisiones por cadena (Figura 9) son un tipo de transmisión de potencia que opera mediante engranajes con enlace flexible, comprendiendo una cadena sin fin y dos ruedas dentadas o estrellas, una conductora y otra conducida.

Sus características principales incluyen flexibilidad, que se da gracias a los elementos articulados que componen la cadena, éstas pueden doblarse y adaptarse a distancias relativamente largas entre ejes, proporcionan una relación de transmisión uniforme entre los ejes conectados. Generalmente, las transmisiones por cadena se emplean en casos donde se requiera una relación de transmisión constante y la distancia entre centros sea relativamente grande, como en bicicletas, motosierras, camiones, tractores y elevadores [22].



*Figura 9. Transmisión por cadena [22].*

### 2.3.3 Árbol de transmisión

Un árbol, es un componente esencial en dispositivos mecánicos diseñado para transmitir movimiento rotatorio y potencia dentro de un sistema [24]. Los árboles o flechas son componentes que giran bajo la acción de pares de torsión y tienen la función de transmitir potencia (Figura 10).

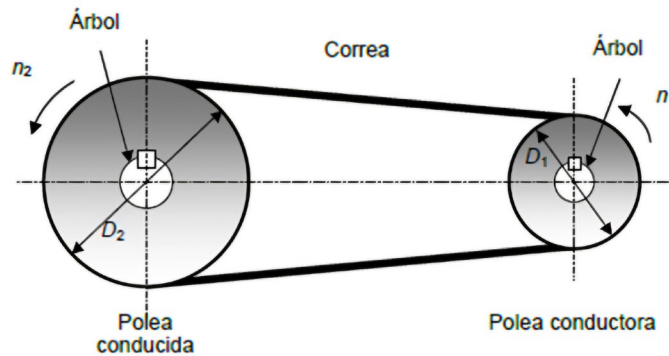


Figura 10. Transmisión por árbol [25].

Los árboles son elementos mecánicos que, durante su funcionamiento, están sometidos a diversos tipos de esfuerzos, como torsión, flexión, carga axial y fuerzas cortantes. Además, al menos una de estas cargas suele ser variable, lo que genera un comportamiento dinámico en el material [25].

Los árboles se clasifican de acuerdo con diferentes criterios para adaptarse a las diversas necesidades de transmisión de potencia (Figura 11). Según su misión, se dividen en árboles de transmisión, árboles de mecanismos auxiliares y árboles principales. En cuanto a la forma de sus ejes, pueden ser de eje recto, acodado o con ejes variables, como los telescópicos y flexibles. Además, según su configuración, se clasifican en lisos, escalonados o con estrías [26].

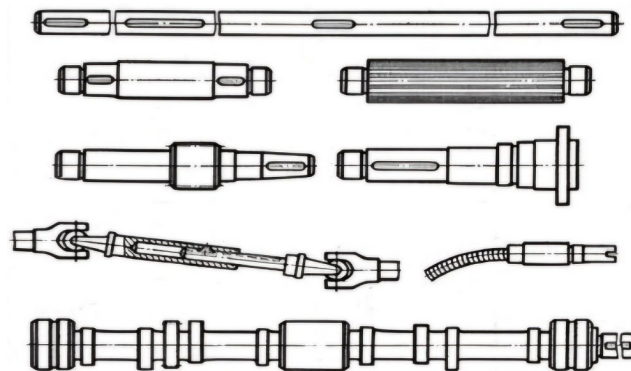
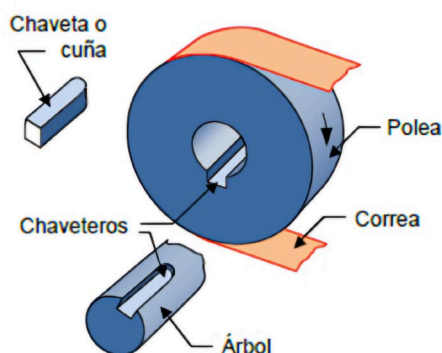


Figura 11. Clasificación de árboles según su misión, forma y configuración [26].

Con lo anterior se identifican los mecanismos principales para transmitir potencia y movimiento en sistemas mecánicos. Para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente, debe garantizarse la unión y fijación adecuada entre el eje y los elementos de transmisión. En el siguiente apartado se describen las cuñas y los acoplamientos como componentes fundamentales para el ensamble, la alineación y la transferencia de torque.

## 2.4 Elementos de unión

El diseño y la conexión entre piezas mecánicas que transmiten potencia requieren de componentes específicos que aseguren la funcionalidad y eficiencia del sistema. Una de estas soluciones son las cuñas o chavetas, las cuales permiten la transferencia de par torsional entre un eje y el elemento de transmisión, como poleas, engranajes o catarinas. Estas cuñas se colocan en ranuras llamadas cuñeros, maquinadas tanto en el eje como en el cubo del componente de transmisión, asegurando una conexión firme y desmontable (Figura 12). Además, cuando se requieren conexiones flexibles que permitan cierto grado de desalineación, como en los casos de transmisión entre un motor y una caja de engranajes, se utilizan acoplamientos flexibles que compensan movimientos relativos debido a la flexión o al desgaste, garantizando un funcionamiento seguro y confiable.



*Figura 12. Cuña paralela [25].*

Un acoplamiento es un dispositivo mecánico diseñado para conectar los extremos de dos ejes con el propósito de transmitir potencia de manera eficiente. Según sus características y aplicaciones, los acoplamientos se dividen en dos categorías principales: rígidos y flexibles. Los acoplamientos flexibles son componentes esenciales en sistemas de transmisión de potencia donde los ejes conectados pueden experimentar desalineamientos axiales, radiales o angulares. A diferencia de los acoplamientos rígidos, que requieren un alineamiento preciso, los acoplamientos flexibles están diseñados para

permitir ciertos grados de movimiento relativo entre los ejes, transmitiendo el par torsional de manera uniforme sin generar esfuerzos axiales o flexionantes significativos.

En aplicaciones que exigen mayor adaptabilidad al desalineamiento, como aquellas con ángulos mayores a tres grados, las juntas universales ofrecen una solución eficiente. Estas permiten desalineamientos angulares de hasta 45° a bajas velocidades y entre 20° y 30° a velocidades superiores a 10 rpm. Sin embargo, las juntas universales simples pueden causar oscilaciones en la velocidad del eje de salida respecto al de entrada, problema que se soluciona utilizando juntas universales dobles. Estas no solo permiten conectar ejes paralelos con desplazamientos significativos, sino que también garantizan una velocidad de giro uniforme en ambos extremos, mejorando la estabilidad y eficiencia del sistema [24].

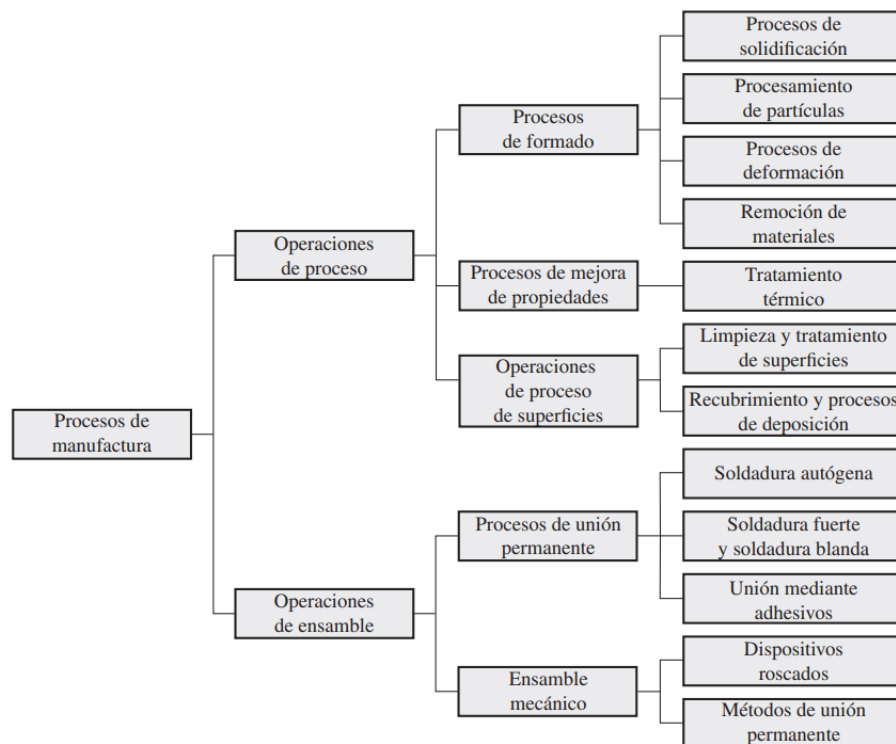
Con base en los elementos de unión revisados, a continuación, se abordan los procesos de manufactura, los cuáles permiten materializar el diseño mediante operaciones de fabricación y ensamble que aseguran su correcto funcionamiento.

## **2.5 Procesos de manufactura**

La manufactura es una actividad esencial para el desarrollo tecnológico, ya que permite transformar materiales en bienes útiles y generar valor agregado, lo que contribuye a la productividad y competitividad. Aunque el término se asocia históricamente a lo “hecho a mano” (manus y factus), en la actualidad predomina la producción mediante maquinaria automatizada y sistemas de control.

Desde una perspectiva tecnológica, la manufactura integra procesos físicos y químicos que modifican la geometría, las propiedades o el acabado de los materiales, así como operaciones de ensamble para obtener productos. En general, un proceso de manufactura se ejecuta mediante operaciones unitarias (pasos individuales en una secuencia de transformación) realizadas en estaciones de trabajo específicas.

Las operaciones de manufactura se clasifican en operaciones de proceso y operaciones de ensamble, las primeras acercan el material al producto final, mediante cambios geométricos, de propiedades o de acabado, pueden aplicarse a piezas individuales o a conjuntos ensamblados, como en recubrimientos o pintura. Las operaciones de ensamble, por su parte, unen componentes para formar subensambles o ensambles mediante distintos métodos de unión, como la soldadura [27]. Esta clasificación se presenta de manera sistemática en la Figura 13.



**Figura 13. Clasificación de los procesos de manufactura [27].**

### 2.5.1 Operaciones de proceso

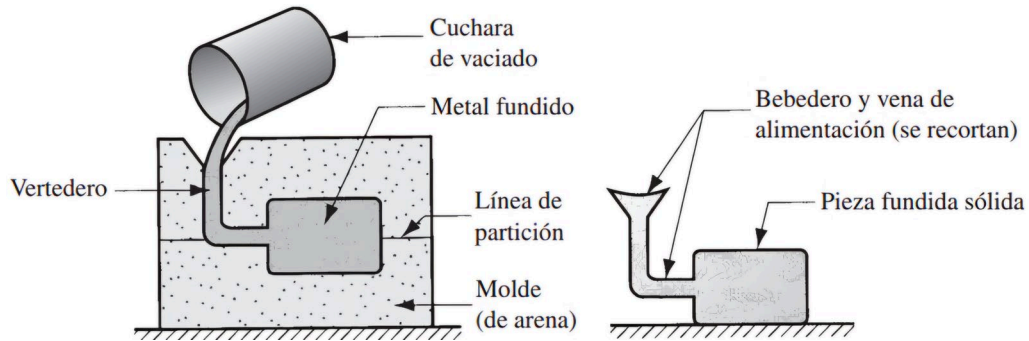
Una operación de proceso es aquella en la que se aplica energía para modificar la forma, las propiedades físicas o el acabado superficial de una pieza, con el fin de agregar valor al material. Esta energía puede ser mecánica, térmica, eléctrica o química, y se aplica de manera controlada mediante máquinas y herramientas. Por lo general el operador interviene principalmente en la preparación, supervisión del ciclo y carga/descarga de piezas. Dado que estas operaciones pueden generar desperdicio y piezas defectuosas, un objetivo central en manufactura es reducir ambos.

La obtención de una pieza final suele requerir una secuencia de operaciones ejecutadas en un orden definido para alcanzar la geometría y condición especificadas en el diseño. Las operaciones de proceso se agrupan en tres categorías: procesos que modifican la geometría, procesos de mejoramiento de propiedades y procesos de superficie.

Los procesos de formado, modifican la geometría del material de trabajo y se clasifican según el estado inicial de este:

- **Procesos de solidificación:**

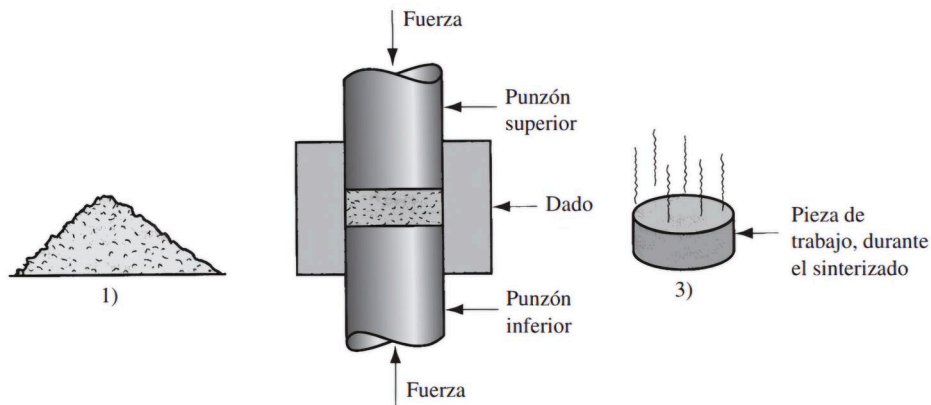
El material de inicio se calienta hasta alcanzar un estado líquido o semifluido, se vacía o se fuerza a fluir dentro de una cavidad denominada molde, donde se enfría hasta solidificar y adquiere la geometría del molde (Figura 14). La mayoría de procesos que operan de esta manera se denominan fundición (metales) o moldeo (plásticos).



**Figura 14. Proceso de solidificación [27].**

- **Procesamiento de partículas o metalurgia de polvos:**

El material inicial consiste en polvos metálicos o cerámicos, la técnica común comprende la presión y sinterizado (Figura 15), primero los polvos se comprimen en una cavidad llamada matriz o dado a una gran presión, posteriormente se calientan para unir las partículas individuales.



**Figura 15. Procesamiento de partículas [27].**

- **Procesos de deformación:**

La pieza de trabajo se conforma mediante la aplicación de fuerzas que exceden la resistencia del material. Para evitar la fractura durante el conformado, el material debe presentar suficiente ductilidad. Con el fin de incrementarla, es común calentar previamente el material a una temperatura inferior a su punto de fusión. Estos

procesos se emplean ampliamente en el conformado de metales e incluyen operaciones como forjado y extrusión (Figura 16).

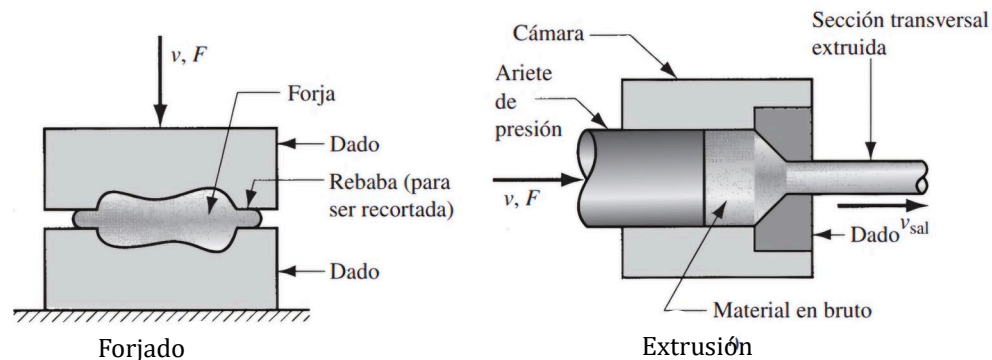


Figura 16. Procesos de deformación [27].

- Procesos de remoción de material:

Son operaciones que retiran material de la pieza de trabajo para obtener la geometría especificada. Los procesos más representativos de esta categoría son las operaciones de maquinado, como torneado, taladrado y fresado (Figura 17), realizadas mediante herramientas de corte con mayor dureza y resistencia que el metal de trabajo. El rectificado también es un proceso común dentro de esta categoría. Además, existen procesos de remoción no tradicionales, que emplean fuentes de energía como láser, haz de electrones, erosión química, descargas eléctricas o energía electroquímica para retirar el material, en lugar de herramientas de corte o rectificado.

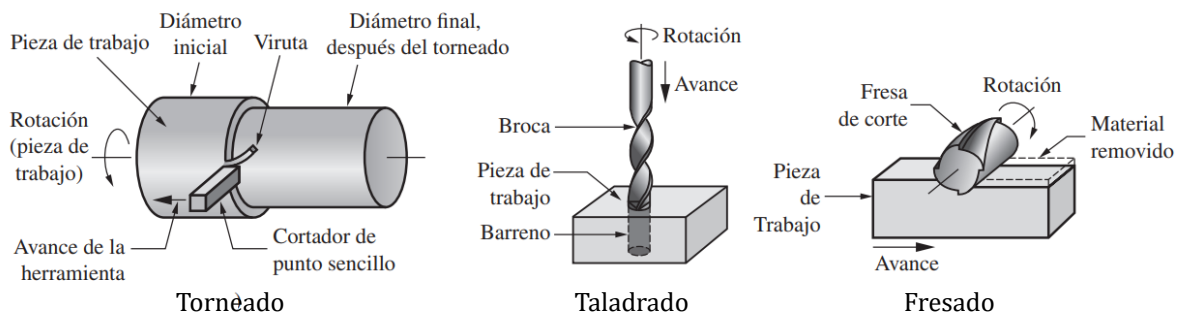


Figura 17. Procesos de remoción de material [27].

Los procesos de mejoramiento de propiedades incrementan o modifican las propiedades mecánicas o físicas del material sin cambios significativos en la geometría de la pieza:

- **Tratamientos térmicos:**  
Comprenden ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados principalmente a metales y vidrios, incluyen procesos como recocido, templado y revenido, para ajustar propiedades como dureza, resistencia y tenacidad.
- **Sinterizado:**  
Proceso térmico aplicado a polvos metálicos o cerámicos previamente compactados, en el que el calentamiento provoca la unión y consolidación de las partículas, aumentando la cohesión y el desempeño del material.

Las operaciones de proceso de superficie se enfocan en la condición exterior de la pieza, su propósito es eliminar contaminantes, mejorar el comportamiento superficial o proteger la pieza mediante capas aplicadas. Estas operaciones incluyen:

- **Limpieza y tratamiento de superficies:**  
La limpieza comprende procesos químicos y mecánicos para remover suciedad, aceite y otros contaminantes. Los tratamientos de superficies pueden incluir operaciones mecánicas, como granallado y chorro de arena, así como procesos físicos, como difusión e implantación de iones.
- **Recubrimientos y procesos de deposición:**  
Los recubrimientos aplican una capa de material sobre la superficie exterior de la pieza que se trabaja, para mejorar su desempeño o protección, entre los más comunes se encuentran la galvanoplastia, el anodizado del aluminio y el recubrimiento orgánico (pintado). Los procesos de deposición de películas delgadas incluyen la deposición física y química de vapor (PVD, QVD), empleados para formar capas muy delgadas de distintos materiales [27].

### **2.5.2 Operaciones de ensamble**

El segundo tipo básico de operaciones de manufactura corresponde al ensamble, en el cual dos o más piezas se unen para formar un nuevo subensamble o ensamble. La unión puede realizarse mediante métodos permanentes o semipermanentes, según los requerimientos de desmontaje y servicio.

Los procesos de unión permanente generan uniones que, por lo general, no pueden desmontarse sin dañar los componentes o sin aplicar procedimientos de separación específicos [27]. Se tienen tres categorías principales:

- **Soldadura:**  
Los procesos de soldadura se clasifican de manera general, en soldadura por fusión, soldadura de estado sólido, soldadura fuerte y soldadura blanda. La soldadura por fusión, se basa en la coalescencia de los materiales mediante calor, normalmente

generado por fuentes químicas o eléctricas, puede emplear o no metal de aporte (Figura 18). En esta categoría se incluyen procesos por arco con electrodo consumible y no consumible, y soldadura por haz de electrones.

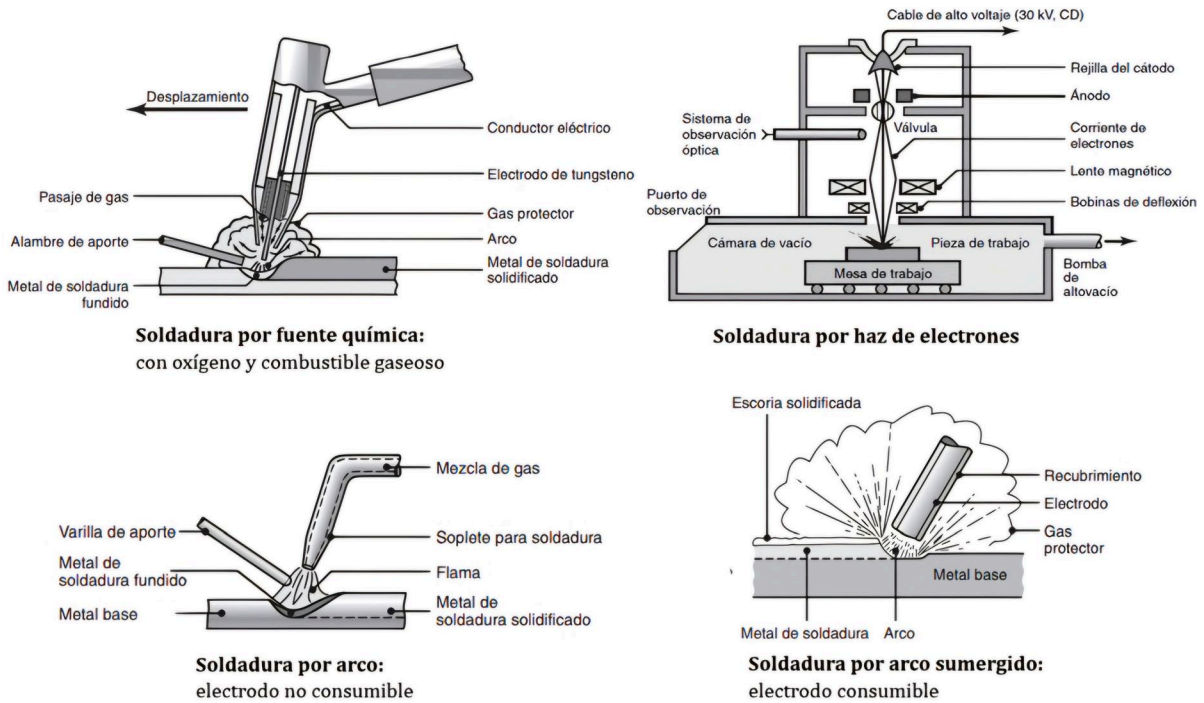
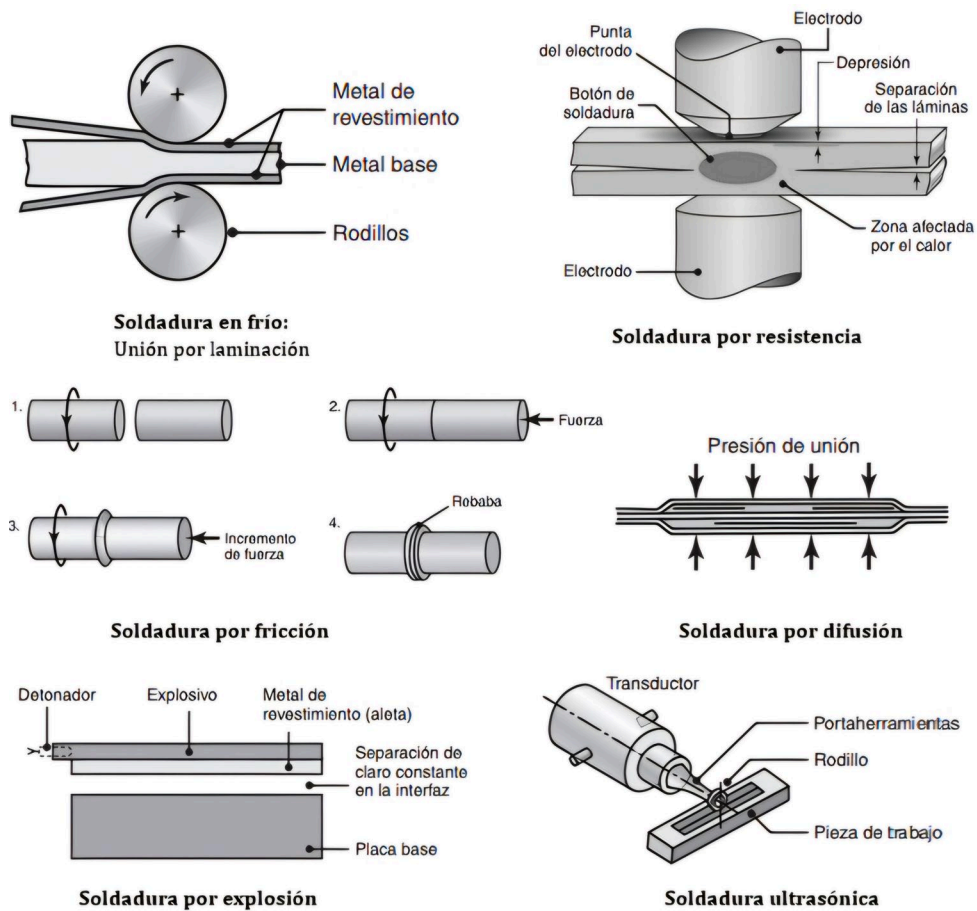


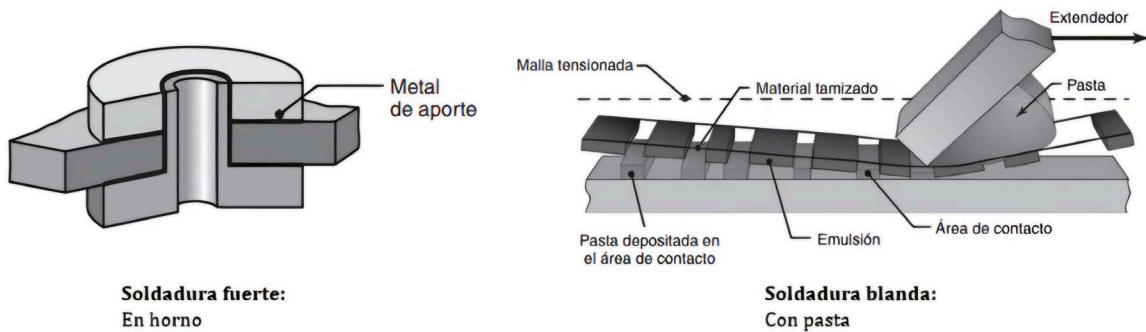
Figura 18. Procesos de soldadura [28].

En la soldadura de estado sólido, la unión se realiza sin fusión del material, por lo que no existe fase líquida en la unión. Entre sus procesos representativos se encuentran la unión por difusión y la soldadura en frío, ultrasónica, por fricción, por resistencia y por explosión (Figura 19).



**Figura 19. Soldadura de estado sólido [28].**

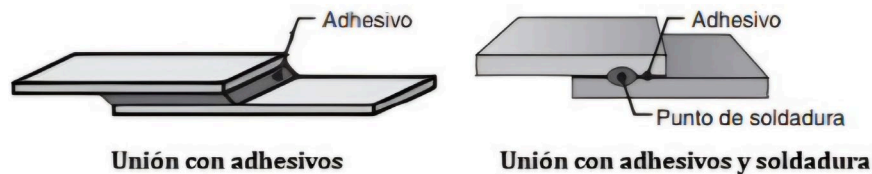
Por su parte, la soldadura fuerte utiliza metal de aporte y se efectúa a temperaturas inferiores a las de la soldadura por fusión. La soldadura blanda también emplea metal de aporte (aleaciones para soldadura blanda) y se realiza a temperaturas aun menores (Figura 20).



**Figura 20. Soldadura fuerte y soldadura blanda [28].**

- **Unión con adhesivos:**

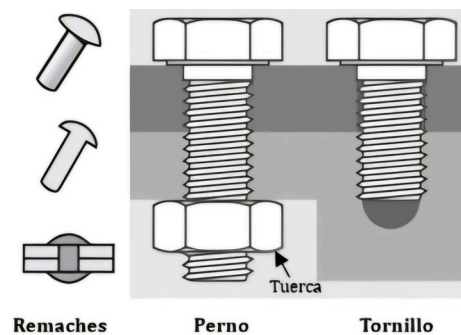
La unión con adhesivos es un método de ensamble en el que dos o más piezas se fijan mediante un material adherente, como alternativa a uniones mecánicas soldadas (Figura 21). Los adhesivos se presentan en diversas formas (líquido, pasta, emulsión, polvo, cinta o película) y, al aplicarse, suelen generar una capa de unión aproximadamente 0.1 mm de espesor. La selección del adhesivo debe considerar propiedades como resistencia al desprendimiento, tenacidad, resistencia química y ambiental (calor y humedad), así como capacidad de humectación de las superficies, ya que este influye en la calidad de la adhesión.



*Figura 21. Unión con adhesivos [28].*

- **Sujeción mecánica:**

Implica métodos tradicionales que usan diferentes sujetadores, en particular pernos, tuercas y remaches (Figura 22) [28].



*Figura 22. Sujeción mecánica [28].*

Una vez revisados los procesos de manufactura y ensamble más comunes, se cuenta con una base para comprender la conversión del diseño mecánico en un prototipo funcional. En el siguiente apartado se abordan los criterios de diseño de transmisiones, enfocados en la selección y dimensionamiento de elementos que transfieren potencia y ajustan velocidad y el par entre ejes.

## 2.6 Diseño de transmisiones

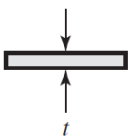

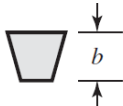
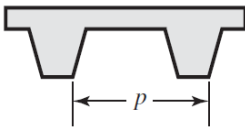
En el diseño de transmisiones de potencia, la meta crucial es acoplar fluidamente la energía cinética desde una fuente hasta un destino predeterminado, atravesando medios eficientes como ejes rotatorios soportados por cojinetes. Componentes auxiliares, como engranajes, bandas, poleas o cadenas, dan forma a dicha transmisión, introduciendo cambios de velocidad y par de torsión entre ejes.

Diseñar un sistema de transmisión de potencia implica un enfoque objetivo en el diseño y selección de cada componente, como engranajes, cojinetes y ejes. Sin embargo, estos componentes no son independientes, por lo que se requiere saber cómo incorporar los detalles de cada componente en un proceso de diseño global [23].

### 2.6.1 Bandas

Existen cuatro tipos principales de bandas, dentro de estas se encuentran las bandas planas, bandas redondas, bandas tipo V y de sincronización. En la Tabla 1 se pueden observar algunas de sus características [23].

Tabla 1. Características de los principales tipos de banda [23].

Tipo de banda	Figura	Unión	Intervalo de tamaños	Distancia entre centros
Plana		Sí	$t = \begin{cases} 0.03 \text{ a } 0.20 \text{ pulg} \\ 0.75 \text{ a } 5 \text{ mm} \end{cases}$	No hay límite superior
Redonda		Sí	$d = \frac{1}{8} \text{ a } \frac{3}{4} \text{ pulg}$	No hay límite superior
Tipo V		Ninguna	$b = \begin{cases} 0.31 \text{ a } 0.91 \text{ pulg} \\ 8 \text{ a } 19 \text{ mm} \end{cases}$	Limitada
De sincronización		Ninguna	$p = 2\text{mm y mayor}$	Limitada

### 2.6.1.1 Transmisiones de banda plana o redonda

Las transmisiones modernas de banda plana, con un núcleo elástico rodeado por un elastómero, son más eficientes y silenciosas que las de engranes y las de banda en V. Tienen una eficiencia del 98%, similar a la de las transmisiones por engranes, mientras que las transmisiones de banda en V varían del 70% al 96% en eficiencia. Las bandas planas reducen el ruido y absorben más vibración torsional que las bandas en V o los engranes. En una transmisión de banda abierta (Figura 23), los ángulos de contacto se ajustan según el ancho de la banda para mejorar el rendimiento y la durabilidad [23]. Para una transmisión de banda abierta, los ángulos de contacto se determinan mediante:

$$\theta_d = \pi - 2\text{sen}^{-1} \frac{D - d}{2C} \quad (2-1)$$

$$\theta_D = + 2\text{sen}^{-1} \frac{D - d}{2C} \quad (2-2)$$

donde      D= diámetro de la polea mayor  
               d= diámetro de la polea menor  
               C= distancia entre centros  
                $\Theta$ = ángulo de contacto

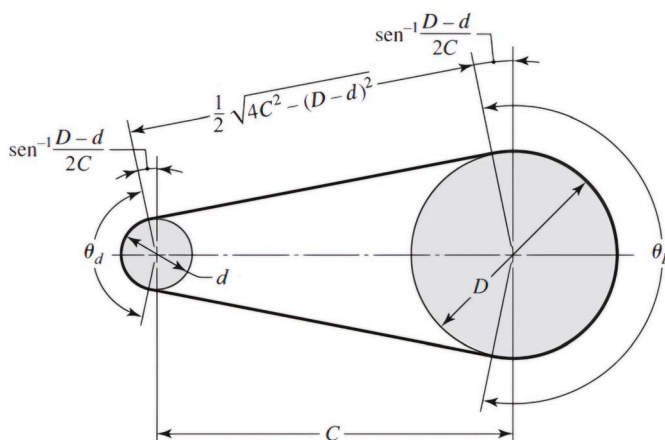


Figura 23. Transmisión de banda abierta [23].

La longitud de la banda se determina sumando las dos longitudes de arco con el doble de la distancia entre el punto inicial y final del contacto.

$$L = [4C^2 - (D - d)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}(D\theta_D + d\theta_d) \quad (2-3)$$

Por otro lado, se puede obtener un conjunto de ecuaciones de las bandas cruzadas (Figura 24), para estas el ángulo de cobertura resulta el mismo que para ambas poleas y está dado por:

$$\theta = \pi + 2\text{sen}^{-1} \frac{D - d}{2C} \quad (2-4)$$

La longitud de las bandas cruzadas se determina mediante:

$$L = [4C^2 - (D + d)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}(D + d)\theta \quad (2-5)$$

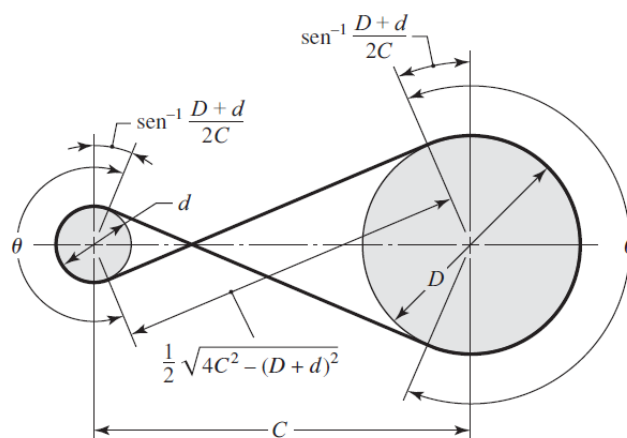


Figura 24. Transmisión de banda cruzada [23].

### 2.6.1.2 Bandas en V

Este tipo de bandas son más eficientes que las planas en términos de transmisión de fuerza, ya que pueden soportar hasta tres veces más presión antes de sobrecargar los cojinetes. Esto permite un arranque más suave y un deslizamiento menor, que debería ser inferior al 2%. Además, funcionan con ángulos de abrazamiento más pequeños y se limitan a ser utilizadas entre árboles paralelos. Las velocidades adecuadas para su uso se encuentran entre 2 y 50 m/s. Es posible emplear varias correas en paralelo para mejorar el rendimiento, que puede alcanzar el 98% [29].

Los cálculos utilizados en la longitud de la banda se basan en la longitud de paso y los cálculos de las relaciones de velocidad se realizan mediante diámetros de paso de las poleas. La longitud de paso  $L_p$  y la distancia entre centros  $C$  se determina mediante [23]:

$$L_p = 2C + \frac{\pi(D + d)}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C} \quad (2-6)$$

$$C = 0.25 \left\{ \left[ L_p - \frac{\pi}{2}(D + d) \right] + \sqrt{\left[ L_p - \frac{\pi}{2}(D + d) \right]^2 - 2(D - d)^2} \right\} \quad (2-7)$$

donde

$D$ = diámetros de paso de la polea mayor

$d$ = diámetro de paso de la polea menor

En los sistemas de transmisión por bandas en V, el arreglo típico de los elementos incluye poleas acanaladas y una banda que transmite el movimiento, como se muestra en la Figura 25.

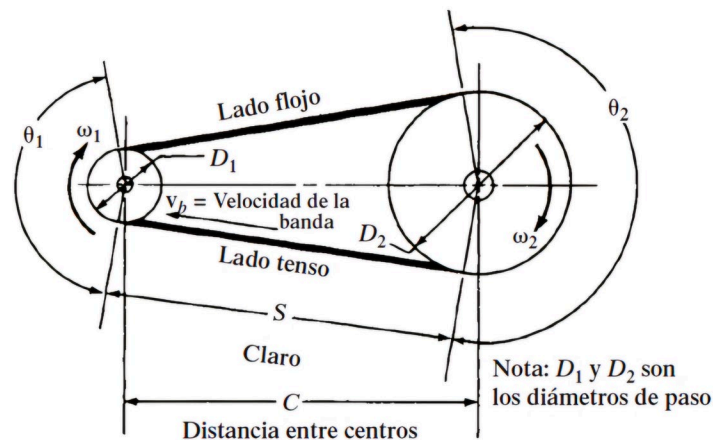


Figura 25. Geometría básica de una transmisión por bandas [30].

La polea acanalada se caracteriza por poseer una o varias ranuras circunferenciales que permiten el apoyo adecuado de la banda, asegurando su alineación y tracción. El tamaño de estas poleas se especifica mediante el diámetro de paso, que corresponde al diámetro teórico sobre el cual se considera que actúa la fuerza de tracción de la banda, y que resulta ligeramente menor al diámetro exterior de la polea.

La relación de transmisión entre la polea motriz y la polea conducida se establece a partir de sus respectivos diámetros de paso, siendo inversamente proporcional a estos. Esta relación se mantiene constante bajo condiciones normales de operación, ya que se asume que no existe deslizamiento entre la banda y las poleas [30]. Por lo tanto, la velocidad lineal de la banda, denotada como  $v_b$ , es la misma en ambas poleas, cumpliendo con la relación:

$$v_b = R_1\omega_1 = R_2\omega_2 \quad (2-8)$$

donde  $R$  es el radio de paso y  $\omega$  la velocidad angular de cada polea. Esta característica permite una transmisión eficiente del movimiento rotatorio, manteniendo sincronía entre los componentes del sistema. La relación de velocidades angulares es:

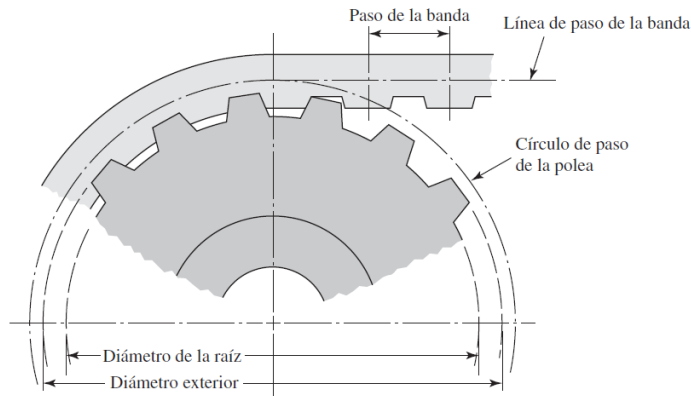
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (2-9)$$

Por otro lado, la eficiencia de una transmisión, se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada:

$$\eta = P_o/P_i \quad (2-10)$$

### 2.6.1.3 Bandas de sincronización

Una banda de sincronización está compuesta por tela ahulada recubierta con nailon y un alambre de acero interno para resistir la carga de tensión. Sus dientes encajan en ranuras axiales en las poleas (Figura 26). Esta banda no se estira ni desliza, lo que garantiza una transmisión de potencia a una velocidad angular constante. No necesita tensión inicial y puede operar a diversas velocidades, con eficiencias entre el 97% y el 99%. Además, no requiere lubricación y es más silenciosa que las transmisiones de cadena. El proceso de selección y diseño de bandas de sincronización resulta muy similar al de bandas en V [23].

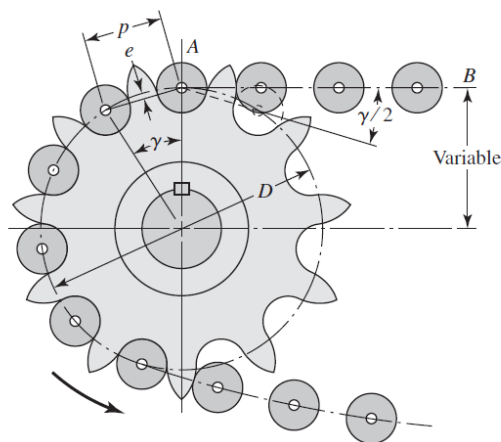


**Figura 26. Transmisión por banda de sincronización [23].**

### 2.6.2 Cadenas de rodillos

Las transmisiones de cadena (Figura 27) se caracterizan por mantener una relación constante, ya que no hay deslizamiento ni arrastre involucrado. Además, ofrecen una larga vida útil y la capacidad de impulsar múltiples ejes desde una única fuente de potencia.

Las cadenas pueden ser fabricadas en hileras sencillas, dobles, triples y cuádruples. El paso de la cadena es designado por  $p$ , el ángulo de paso por  $\gamma$  y el diámetro de paso de la Catarina por  $D$  [23].



**Figura 27. Acoplamiento de una cadena y una catarina [23].**

La longitud de la cadena  $L$  está dada por:

$$\frac{L}{p} = \frac{2C}{p} + \frac{N_1 N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C/p} \quad (2-11)$$

La distancia entre centros C está dada por:

$$C = \frac{p}{4} \left[ -A + \sqrt{A^2 - 8 \left( \frac{N_2 - N_1}{2\pi} \right)^2} \right] \quad (2-12)$$

Donde

$$A = \frac{N_1 + N_2}{2} - \frac{L}{p} \quad (2-13)$$

### 2.6.3 Árbol

El diseño y análisis de ejes requieren considerar diversas condiciones de esfuerzo que pueden ocurrir simultáneamente en diferentes partes del componente. En las secciones del eje que transmiten potencia, es común encontrar esfuerzos cortantes torsionales combinados con esfuerzos flexionantes (Figura 28). Otras áreas pueden experimentar exclusivamente esfuerzos flexionantes, mientras que algunos puntos podrían estar sometidos a esfuerzos cortantes verticales o incluso a la superposición de esfuerzos axiales de tensión o compresión. Existen también zonas del eje donde los esfuerzos son insignificantes o nulos. Para garantizar un diseño robusto, es habitual realizar cálculos en múltiples puntos del eje, evaluando las diversas condiciones de carga y geometría presentes en el sistema [24].

El esfuerzo cortante se calcula con:

$$\tau_d = \frac{s_y}{N\sqrt{3}} = \frac{0.577 s_y}{N} \quad (2-14)$$

Donde

$s_y$  = resistencia a la fatiga

$N$  = factor de diseño a la resistencia de fluencia

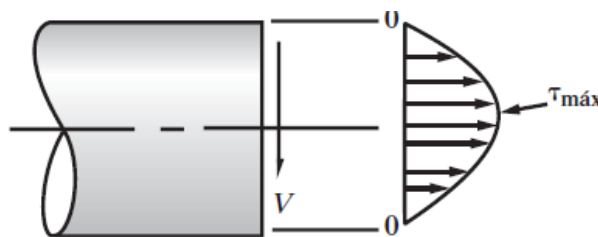


Figura 28. Distribución del esfuerzo cortante en una sección transversal del eje [25].

El esfuerzo cortante vertical máximo para el caso especial de una sección transversal circular sólida se puede calcular con:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{4V}{3A} \quad (2-15)$$

Donde

V = fuerza cortante vertical

A = área de la sección transversal

El esfuerzo normal de diseño-carga por fatiga está dado por:

$$\sigma_d = \frac{s'_n}{N} \quad (2-16)$$

Donde

$s'_n$  = resistencia estimada a la fatiga real

El diámetro D del eje se calcula con:

$$D = \left[ \frac{32 N}{\pi} \sqrt{\left[ \frac{K_t M}{s'_n} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[ \frac{T}{s_y} \right]^2} \right]^{1/3} \quad (2-17)$$

Donde

N = factor de diseño

$K_t$  = factor de concentración de esfuerzo

$s'_n$  = resistencia a la fatiga

M = momento flexionante

T = par torsional

Una vez establecidos los parámetros de diseño de la transmisión, se procede a verificar la capacidad estructural del prototipo bajo cargas de operación. En el siguiente apartado se presenta el análisis de esfuerzos y deformaciones de sus componentes.

## 2.7 Análisis de esfuerzos y deformaciones

Uno de los objetivos fundamentales del análisis de esfuerzos es identificar los puntos dentro de un elemento mecánico donde se presentan los niveles máximos de esfuerzo bajo condiciones de carga específicas. Los esfuerzos normales se clasifican como de tensión cuando tienden a alargar el material, o de compresión cuando buscan acortarlo.

En contraste, los esfuerzos cortantes se originan típicamente por efectos como el cortante directo, las cargas transversales en vigas o la torsión en ejes rotatorios. Este último fenómeno cobra una relevancia especial en el diseño de elementos de transmisión de potencia, ya que induce un esfuerzo cortante sobre el área transversal del eje, con una tendencia a deformarlo angularmente [24]. La torsión está estrechamente relacionada con la potencia que se transmite a través de un eje y su velocidad angular, esta relación se expresa mediante la ecuación:

$$T = P/n \quad (2-18)$$

donde P es la potencia en watts (W) o newton metros por segundo (N-m/s), que son equivalentes, T es el par de torsión en newton-metro (N-m) y n es la velocidad de giro en radianes por segundo (rad/s). Esta fórmula refleja cómo, al mantener constante la potencia transmitida, un aumento en la velocidad angular implica una disminución del par, y viceversa.

En el diseño de maquinaria, esta relación también se puede expresar en el Sistema Inglés Tradicional, en donde la potencia se mide en caballos de fuerza (hp), la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (rpm) y el par en libra-pulgada (lb-in), la fórmula se adapta como:

$$T = 63000 P/n \quad (2-19)$$

donde T es el par de torsión en lb-in, P es la potencia en hp y n es la velocidad de giro en rpm. Esta ecuación incorpora una constante (63,000) que resulta de la conversión entre unidades y permite una aplicación directa en cálculos de ingeniería sin necesidad de conversiones adicionales.

Este vínculo entre par, potencia y velocidad de giro es esencial para seleccionar y dimensionar elementos de transmisión, como ejes, engranajes y acoplamientos.

Con los requerimientos de par y velocidad definidos, se analiza la fuente de potencia y el sistema de control necesarios para suministrar y regular dichas condiciones. A continuación, se describen los equipos de potencia y control utilizados, particularmente el motor eléctrico y el variador de frecuencia.

## 2.8 Equipos de potencia y control

Un motor eléctrico es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica rotacional mediante la interacción entre campos magnéticos y corrientes en conductores. En términos de desempeño, lo que define al motor en una aplicación no es solo su potencia nominal, sino también su par (torque) disponible a distintas velocidades (curva par-velocidad), su eficiencia  $\eta$ , su factor de potencia ( $\cos \varphi$ ), su capacidad de arranque, su elevación de temperatura (clase térmica/aislamiento) y su régimen de servicio (operación continua).

Los motores de inducción monofásicos son muy comunes en electrodomésticos y equipos de baja potencia. Sin embargo, una característica clave es que, con alimentación monofásica, el motor requiere una fase auxiliar para ser auto arrancable. Por otro lado, los motores trifásicos son la solución dominante en industria porque la alimentación trifásica genera de manera natural un campo giratorio más “uniforme”, lo que se traduce, en la práctica, en operación más suave, buen desempeño con cargas continuas y, típicamente, mejor eficiencia y factor de potencia que alternativas monofásicas de potencia comparable [31].

Un variador de frecuencia (VFD) es un dispositivo electrónico utilizado para controlar la velocidad y el torque de motores eléctricos de corriente alterna (AC), modificando la frecuencia y el voltaje de la señal que los alimenta. Su funcionamiento se basa en tres etapas principales: rectificación de la señal de entrada AC, conversión a corriente continua (DC), y posterior modulación por un inversor para generar una señal AC de frecuencia variable. Esta capacidad de regulación permite un control preciso del comportamiento dinámico del motor, lo que resulta en una mayor eficiencia energética, reducción del desgaste mecánico y mejoras en la estabilidad del sistema. Además, los VFD permiten realizar arranques y paradas suaves, evitando picos de corriente que podrían dañar componentes eléctricos o mecánicos del sistema [32].

## 2.9 Diseño y desarrollo de productos

El diseño y desarrollo de productos se define como el conjunto de actividades que inicia con la identificación de una necesidad u oportunidad y concluye cuando el producto se fabrica y queda listo para su uso. Comprende la identificación de oportunidades, segmentos y requerimientos, la generación y evaluación de conceptos y traduce necesidades en especificaciones de ingeniería e industriales. Asimismo, integra criterios como desempeño, seguridad, costo y factibilidad de fabricación, además de la planeación del ensamble y de los métodos de producción necesarios para materializar la propuesta. En conjunto, este proceso busca asegurar que la solución responda a las necesidades del usuario y sea viable mediante procesos de manufactura adecuados.

Para ejecutar las actividades de diseño y desarrollo de productos, es habitual utilizar herramientas y métodos estructurados, es decir, procedimientos con pasos definidos y, en algunos casos, formatos o plantillas que facilitan la organización de la información. Estos métodos aportan valor al hacer explícito el proceso de toma de decisiones, asegurar la consideración de aspectos esenciales y generar un registro del razonamiento y de los resultados. Sin embargo, no deben aplicarse de forma rígida, ya que pueden adaptarse según las necesidades del proyecto y su contexto [9]. Con este enfoque, a continuación, se describen las principales herramientas empleadas en la metodología de este trabajo.

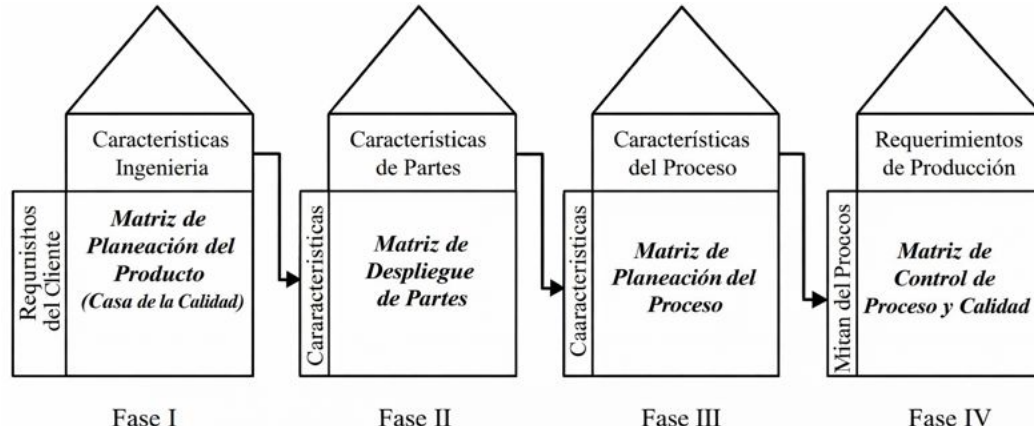
### **2.9.1 Despliegue de la Función de Calidad**

El Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática utilizada en el diseño y desarrollo de productos para garantizar que las necesidades y expectativas de los clientes se traduzcan en especificaciones técnicas y características del producto. Este enfoque, permite reducir costos y tiempos de diseño al integrar equipos interfuncionales de marketing, ingeniería y producción [33].

El QFD se organiza en cuatro fases (Figura 29) que permiten traducir los requerimientos del cliente a lo largo de una planeación estructurada, mediante matrices que relacionan necesidades con variables técnicas.

- En la Fase I (planeación del producto o Casa de la calidad), los requerimientos del cliente se relacionan con las características de técnicas del producto para traducir y priorizar las variables técnicas con mayor impacto en la satisfacción del usuario. La matriz evalúa el grado de relación entre los “Qué” y “Cómo” e incorpora la matriz superior de correlaciones para identificar interacciones positivas o negativas entre características técnicas. Además, permite definir metas técnicas, estimar su dificultad de logro y calcular la importancia relativa de cada característica técnica de acuerdo con el peso de los requerimientos del cliente.
- La Fase II (despliegue de partes) vincula las características técnicas priorizadas en la Fase I con atributos críticos medibles de los componentes. En esta fase se mantiene el principio de despliegue: los “Cómo” de la Casa de la calidad pasan a ser los “Qué” de la segunda matriz, y se determinan los nuevos “Cómo” asociados a las características críticas que deben controlarse a nivel componente para cumplir el diseño.
- La Fase III (planeación del proceso) relaciona los atributos críticos de los componentes con los procesos clave de fabricación, estableciendo cómo se producirán conforme a lo especificado. El enfoque se desplaza hacia parámetros y condiciones del proceso, asegurando trazabilidad entre lo definido como crítico en el producto y la forma en que se fabrica.

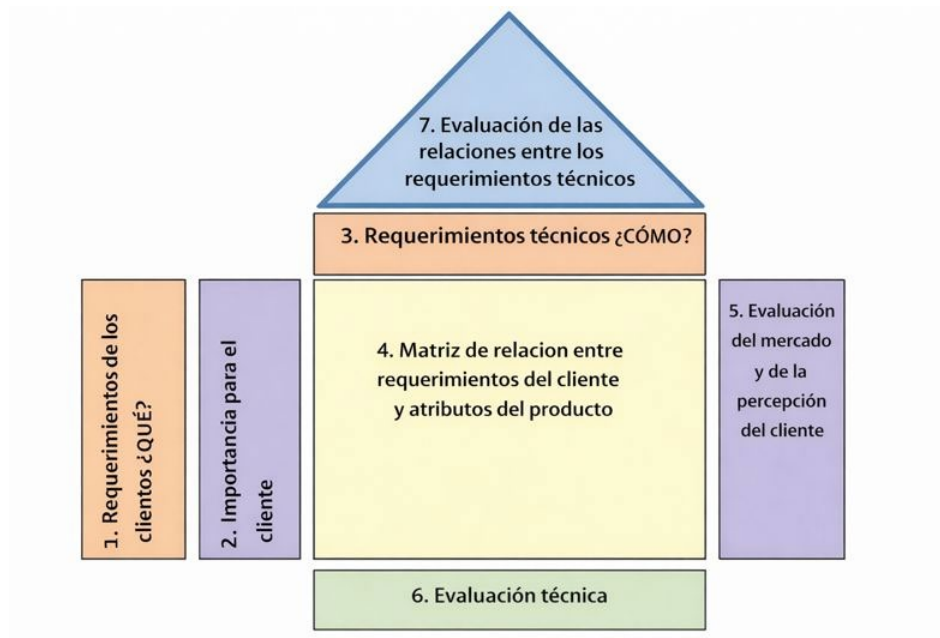
- Finalmente, la Fase IV (proceso y control de calidad) define parámetros y métodos de control para monitorear la producción y asegurar la calidad. Los requerimientos se vinculan con acciones de control para sostener consistentemente los objetivos establecidos [34][35].



**Figura 29. Esquema de las cuatro fases del QFD [35].**

De manera general, el proceso inicia con la identificación y priorización de la voz del cliente, cuyos requerimientos se obtienen mediante técnicas de recolección de información como encuestas, entrevistas, análisis de registros de ventas, quejas, devoluciones, observación directa o consultas a cámaras industriales y dependencias oficiales y se jerarquizan según su importancia. Posteriormente, estos requerimientos se traducen en características técnicas del producto mediante la Casa de la calidad, matriz que apoya la toma de decisiones en ingeniería, diseño y mercadotecnia [36].

El QFD utiliza matrices para analizar la relación entre necesidades el cliente, características del producto, componentes y procesos, lo que favorece la planeación la comunicación y la toma de decisiones durante el desarrollo, asegurando la alineación del resultado con los requerimientos del usuario (Figura 30) [37]. En este trabajo por el alcance definido, se aplicó únicamente una adaptación de la Fase I, orientada a relacionar y priorizar los requerimientos del cliente y las características técnicas del sistema, sin extender el despliegue a fases posteriores.



*Figura 30. Casa de la calidad [33].*

### 2.9.2 Diseño para manufactura

El diseño para manufactura (DPM) es un enfoque que busca asegurar que un producto, además de cumplir necesidades del cliente y especificaciones técnicas, sea factible de fabricar y ensamblar con eficiencia, dado su impacto directo en el costo de producción.

Su relevancia radica en que, en etapas avanzadas del desarrollo, suele ser complejo vincular requerimientos iniciales con decisiones concretas de diseño, por ello, el DPM integra información del producto (bosquejos, planos, especificaciones y alternativas), conocimientos de los procesos de manufactura y ensamble, y estimaciones de costo, volumen y programación.

Su aplicación inicia en el desarrollo del concepto, donde el costo orienta la selección de alternativas, continúa en el diseño a nivel sistema al definir la arquitectura y la descomposición del producto considerando complejidad y costo, y se consolida en el diseño de detalle, cuando se obtienen estimaciones más precisas y se ajustan decisiones para facilitar la manufactura [9].

### 2.9.3 Diagrama de flujo

Un diagrama de flujo es una herramienta que representa gráficamente la secuencia de actividades e información que, por lo general, conforman el proceso de desarrollo de un producto. Permite visualizar etapas, orden de ejecución y puntos de revisión o decisión al

cierre de cada fase, con el fin de verificar su cumplimiento y determinar la continuidad del proyecto. Según el tipo de producto, el flujo puede describirse como un proceso genérico, como un esquema iterativo (en espiral) cuando se repiten actividades de diseño, prototipado y pruebas, o como un flujo con etapas paralelas en sistemas complejos con múltiples subsistemas. Una vez definido, el diagrama facilita la comunicación y estandarización del proceso, al clarificar actividades, responsabilidades y relaciones entre etapas [9].

#### **2.9.4 Diagrama de operaciones de proceso**

El diagrama de operaciones de proceso es una representación gráfica que describe, de forma ordenada, las operaciones e inspecciones necesarias para transformar un material hasta obtener un producto o subensamble. En él se indican los puntos de entrada de materiales y la secuencia de actividades, sin incluir movimientos o manipulación de materiales. De manera complementaria, puede incorporar información como tiempos, condiciones de ejecución y observaciones útiles para el análisis del método.

Su objetivo es ofrecer una visión integrada del proceso para estudiar sistemáticamente sus etapas, comparar alternativas, identificar oportunidades de mejora, reducir demoras o tiempos improductivos. Asimismo, facilita la documentación y estandarización del método de fabricación al concentrar en un solo esquema operaciones e inspecciones relacionadas.

Para elaborarlo, suele elegirse como base la pieza con mayor número de operaciones o el componentes principal de montaje. A partir de esta pieza se traza la línea de material y una línea de recorrido donde se colocan en orden los símbolos de operación e inspección. Junto a cada símbolo se añade una breve descripción (cortar, taladrar, inspeccionar, etc.) y, cuando aplica, el tiempo asociado. Conforme se integran otros componentes o subensambles, se incorporan líneas adicionales que indican el punto de unión al proceso.

Finalmente, las actividades se numeran de forma consecutiva y el diagrama se complementa con datos de identificación, lo que lo convierte en una herramienta práctica para documentar, analizar y mejorar procesos de manufactura [38].

---

## CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

---

En este capítulo se incluyen los resultados desarrollados en 5 fases, las cuales se cumplen de acuerdo con la Figura 1, aplicando diferentes métodos para llevar a cabo cada una de estas.

### 3.1 Fase 0. Planeación

En la Fase 0 del proceso de desarrollo de productos, se estableció una planificación detallada que orienta el desarrollo de una transmisión de potencia adaptable a dos máquinas agrícolas.

La identificación de oportunidades en esta fase es crucial para orientar los esfuerzos hacia soluciones que resuelvan problemas reales y aprovechen áreas de crecimiento. En el contexto de la agricultura, particularmente en la región Mixteca y Huajuapán de León, Oaxaca, se ha identificado una serie de desafíos y necesidades clave, lo que brinda oportunidades para el diseño e innovación en maquinaria agrícola.

Uno de los primeros pasos en la identificación de oportunidades consistió en llevar a cabo entrevistas con usuarios en la industria agrícola, en este caso, los pequeños productores de la región Mixteca. A través de estas entrevistas, se ha constatado que muchos de estos agricultores dependen de equipos que, si bien funcionales, no son lo suficientemente versátiles para cubrir todas sus necesidades. A menudo, los usuarios han realizado modificaciones caseras a su maquinaria para optimizar su rendimiento o adaptarla a tareas específicas. Estas modificaciones revelan que los productores necesitan maquinaria con mayor flexibilidad, capaz de realizar múltiples funciones con menos recursos. La falta de equipo adecuado los lleva a improvisar soluciones, lo que sugiere que existe una oportunidad para el desarrollo de implementos para maquinaria que integre diversas tareas agrícolas.

En la actualidad, existen en el mercado una variedad de implementos para tractores que pueden ser accionados mediante una sola toma de fuerza. Estos incluyen molinos, cosechadoras, sembradoras, cortadoras y desgranadoras, diseñados principalmente para actividades agrícolas a gran escala. Si bien estas máquinas son eficientes para grandes producciones agrícolas, se ha identificado una brecha importante: los pequeños productores, que representan una parte significativa del sector agrícola, no tienen acceso a implementos diseñados para maquinaria de menor capacidad que les permita aprovechar la misma toma de fuerza para diversas tareas.

La misión de este proyecto es desarrollar un sistema de transmisión común que permita el funcionamiento óptimo de una desgranadora de maíz y una picadora de forraje, con el objetivo de reducir la necesidad de adquirir un motor para cada máquina. Esta propuesta de valor se enfoca en disminuir los gastos adicionales asociados con la compra de múltiples motores, maximizando así la utilidad del motor adquirido y proporcionando un ahorro significativo de recursos para los agricultores.

El proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de transmisión que permita accionar dos máquinas agrícolas, utilizando un motor eléctrico como fuente de energía, que sea intercambiable y adecuado a ambas máquinas. El mercado primario se enfoca en los agricultores de la región Mixteca, mientras que los mercados secundarios incluyen a los agricultores del estado de Oaxaca. Las partes involucradas en este desarrollo incluyen a los usuarios finales (agricultores), a los agricultores minoritarios y a la Brigada de Promoción al Desarrollo de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), quienes juegan un papel clave en la promoción y adaptación del producto en la región.

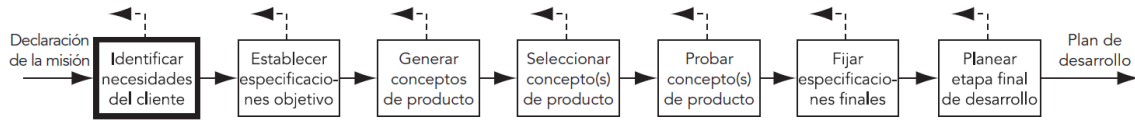
### **3.2 Fase 1. Desarrollo del concepto**

En esta fase se abordó el proceso de desarrollo del concepto, que implica la identificación entre necesidades del cliente y especificaciones del producto. Las necesidades son independientes de cualquier producto particular que se pudiera desarrollar, estas no son específicas del concepto. Por otro lado, las especificaciones dependen del concepto que se seleccionó, estas dependerán de lo que sea técnica y económicamente factible, y de lo que los competidores ofrezcan en el mercado, así como las necesidades del cliente.

Después de identificar las necesidades del cliente, se definieron las especificaciones objetivo, que representan las metas del equipo de desarrollo y describen un producto que se cree será exitoso en el mercado. Estas especificaciones se ajustaron más adelante según las limitaciones del concepto del producto seleccionado.

El próximo paso es la generación de conceptos, que parte de las necesidades del cliente y las especificaciones objetivo, como se muestra en la Figura 31. Una buena generación de conceptos asegura que se hayan explorado todas las alternativas posibles, lo que reduce la probabilidad de que se pierda un concepto superior más adelante o de que un competidor presente un producto mejor.

Como cuarto paso en el proceso de desarrollo del producto, se encuentra la selección del concepto. Este paso implica evaluar los conceptos generados en función de las necesidades del cliente y otros criterios relevantes. Se compararon los puntos relativamente fuertes y débiles de cada concepto, considerando aspectos como la viabilidad técnica, la eficiencia, la rentabilidad y la satisfacción del cliente [9].



**Figura 31. Desarrollo del concepto Fase 1 [9].**

### 3.2.1 Identificar las necesidades del cliente

En este paso, se recopilaron datos sin procesar de los clientes, para esto se realizaron entrevistas presenciales, a 3 usuarios involucrados en realizar actividades agrícolas. Se les pidió que contestaran dicha encuesta, con base en su experiencia utilizando específicamente las máquinas desgranadoras de maíz y picadoras de forraje. Posteriormente las respuestas de los usuarios, se interpretaron en términos de necesidades del cliente como se muestra a continuación en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

**Tabla 2. Necesidades interpretadas usuario 1.**

<b>Cliente:1</b> <b>Dirección:</b> Huajuapán de León <b>Tipo de usuario:</b> Agricultor		<b>Entrevistador:</b> Irene Avila Sánchez <b>Fecha:</b> 8 de octubre, 2024 <b>Actualmente usa:</b> Picadora y desgranadora
Pregunta/sugerencia	Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
Frecuencia de uso de la desgranadora	La desgranadora la uso 2 veces al año	El sistema presenta un desempeño confiable ante largos periodos de inactividad.
Marca de desgranadora utilizada	Hingia	
Volumen de producción que maneja para la desgranadora	1 t de maíz por temporada	El sistema es capaz de manejar el volumen de trabajo esperado durante el periodo de uso.
Tiempo que usa la máquina	6 – 10 h	El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante largos periodos de tiempo.
Marca del motor y potencia	Honda de 9 hp	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Frecuencia de uso de la picadora	Varía el tiempo de uso, pero usualmente cada 8 días se realiza la molienda	El sistema soporta un uso periódico y repetitivo, garantizando un funcionamiento confiable.
Marca de la picadora	Hingia	
Volumen de producción que maneja para la picadora	1 t de forraje por temporada	El sistema es capaz de soportar la carga de trabajo prevista.
Tiempo que usa la máquina	6 – 10 h	El sistema garantiza un funcionamiento continuo.
Problemas, defectos o quejas del producto ya existente	Deterioro de las bandas	El sistema es confiable y resistente que no utiliza bandas.

	Problemas de arrancado	El sistema ofrece una puesta en marcha sin fallas.
	Hay problemas con el procesamiento adecuado del material molido (no se muele bien)	El sistema ofrece la potencia adecuada y desempeño constante para un molido uniforme.
	Que son transmisiones fijas	El sistema es intercambiable.
Características que considera indispensables para el sistema	Fácil manejo	El sistema es intuitivo y fácil de usar para los operadores.
Es importante que la transmisión soporte variaciones de carga o volumen de trabajo	Sí	El sistema ofrece variaciones de carga o volumen de trabajo.
Es más importante la velocidad que la eficiencia o el consumo de energía.	Es más importante la eficiencia	El sistema brinda la eficiencia operativa y energética.
Qué le gustaría mejorar de la transmisión en términos de mantenimiento	Que no haya que comprar accesorios	El sistema minimiza los requerimientos de mantenimiento.
Expectativas	Que sea rentable	El sistema ofrece una rentabilidad favorable, reduciendo costos de mantenimiento.
	No gastar en refacciones	El sistema es duradero.
	Relación costo-beneficio a largo plazo	El sistema maximiza la relación costo-beneficio a largo plazo en términos de eficiencia y durabilidad.
	Que no haya que comprar repuestos	El sistema ofrece una operación confiable.
Velocidad variable	Proporcionaría un adecuado manejo del material trabajado	El sistema ofrece velocidad variable para adaptarse a diferentes tipos de materia prima.
Es fácil usar el producto existente	Se necesita capacitación previa para usar las máquinas	El sistema es de fácil manejo y control intuitivo.
Diseño de transmisión	Prefiero que sea de control manual	El sistema ofrece un control manual.
Importancia de que el sistema sea de bajo peso	Sería de fácil manejo	El sistema es fácil de manipular y transportar.

**Tabla 3. Necesidades interpretadas usuario 2.**

<b>Cliente: 2</b>		<b>Entrevistador: Irene Avila Sánchez</b>
<b>Dirección: Huajuapán de León</b>		<b>Fecha: 8 de octubre, 2024</b>
<b>Tipo de usuario: Agricultor</b>		<b>Actualmente usa: Picadora y desgranadora</b>
<b>Pregunta/sugerencia</b>	<b>Enunciado del cliente</b>	<b>Necesidad interpretada</b>
Frecuencia de uso de la desgranadora	La desgranadora la uso 2 veces al año	El sistema es capaz de soportar largos periodos de inactividad.
Marca de desgranadora utilizada	Hechiza	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Volumen de producción que maneja para la desgranadora	2 t de maíz por año	El sistema maneja eficientemente el volumen de producción previsto.
Tiempo que usa la máquina	3 h/día	El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante el tiempo de operación diario.
Marca de la picadora	Incra	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Volumen de producción que maneja para la picadora	6 t de forraje por temporada	El sistema es capaz de funcionar eficientemente para un uso intenso.
Tiempo que usa la máquina	3 h / día	El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante el tiempo de operación diario.
Frecuencia de uso de la picadora	Cada 8 días	El sistema soporta un uso periódico y repetitivo, garantizando un funcionamiento confiable.
Cada cuanto tiempo realiza mantenimiento a la transmisión	Cada 6 meses	El sistema es duradero y minimiza los requerimientos de mantenimiento.
Problemas, defectos o quejas del producto ya existente	Por cada implemento se ocupa un motor para moverlo	El sistema permite utilizar un solo motor para accionar diferentes máquinas.
	Problemas de arrancado	El sistema ofrece una puesta en marcha sin fallas.
Características que considera indispensables para el sistema	Que sea fácil de operar y arrancar el motor	El sistema facilita la operación y permite un arranque de motor sencillo y confiable.
Es importante que la transmisión soporte variaciones de carga o volumen de trabajo	Sí	El sistema ofrece variaciones de carga o volumen de trabajo.
Es más importante la velocidad que la eficiencia o el consumo de energía.	Es más importante la eficiencia	El sistema brinda la eficiencia operativa y energética.
Qué le gustaría mejorar de la transmisión en términos de mantenimiento	Que no haya que comprar accesorios	El sistema minimiza los requerimientos de mantenimiento.
Expectativas	No gastar en piezas costosas	El sistema evita gastos en piezas costosas.

	Que sea duradera	El sistema es de materiales resistentes a la carga y ambiente de trabajo.
	Relación costo-beneficio a largo plazo	El sistema maximiza la relación costo-beneficio a largo plazo en términos de eficiencia y durabilidad
	Que resista condiciones de trabajo difíciles en el campo	El sistema soporta las condiciones de trabajo adversas en el campo.
Velocidad variable	Proporcionaría un adecuado manejo del material trabajado	El sistema ofrece velocidad variable para adaptarse a diferentes tipos de materia prima.
Es fácil usar el producto existente	Se necesita capacitación previa para usar las máquinas	El sistema es de fácil manejo y control intuitivo.
Diseño de transmisión	Control manual detallado	El sistema puede ofrecer un control manual para dar al usuario un mayor control sobre el equipo.
Importancia de que el sistema sea de bajo peso	Para mover el equipo si es importante	El sistema es fácil de manipular y transportar.

**Tabla 4. Necesidades interpretadas usuario 3.**

<b>Cliente: 3</b>		<b>Entrevistador: Irene Avila Sánchez</b>
<b>Dirección: Huajuapán de León</b>		<b>Fecha: 8 de octubre, 2024</b>
<b>Tipo de usuario: Veterinario y agricultor</b>		<b>Actualmente usa: Picadora</b>
<b>Pregunta/sugerencia</b>	<b>Enunciado del cliente</b>	<b>Necesidad interpretada</b>
Frecuencia de uso de la desgranadora	2 veces al año	El sistema es capaz de soportar largos periodos de inactividad.
Marca de desgranadora utilizada	-----	
Marca del motor y potencia	Husky® 5 hp	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Volumen de producción que maneja para la desgranadora	2 t de maíz por año	El sistema maneja eficientemente el volumen de producción previsto.
Tiempo que usa la máquina	4-6 h/día	El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante el tiempo de operación diario.
Marca de la picadora	Inkra	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Marca del motor y potencia	Honda® 7.5 hp	El sistema brinda un acoplamiento eficiente para un desempeño óptimo.
Volumen de producción que maneja para la picadora	6 t de forraje por temporada	El sistema puede tener capacidad de carga y resistencia.

Tiempo que usa la máquina	4-6 h/día	El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante el tiempo de operación diario.
Frecuencia de uso de la picadora	Cada 8 días	El sistema soporta un uso periódico y repetitivo, garantizando un funcionamiento confiable.
Cada cuanto tiempo realiza mantenimiento a la transmisión	2 veces al año	El sistema tiene una estructura que minimiza la necesidad de mantenimiento regular.
Problemas, defectos o quejas del producto ya existente	Deterioro de bandas	El sistema emplea un sistema confiable y resistente que no utiliza bandas.
	Es poco eficiente	El sistema optimiza el rendimiento de las máquinas agrícolas.
	Se desajusta la transmisión	El sistema es estable y se mantiene ajustado durante el funcionamiento.
	La transmisión es de una sola potencia	El sistema ofrece opciones de potencia variable, para adaptarse a diferentes requerimientos de las máquinas.
Características que considera indispensables para el sistema	Que pueda manejar cargas pesadas sin problema	El sistema es robusto y capaz de manejar cargas pesadas sin riesgo de daños.
Es importante que la transmisión soporte variaciones de carga o volumen de trabajo	Sí, en 200 kg	La transmisión se ajusta a las variaciones de carga y volumen de trabajo.
Es más importante la velocidad que la eficiencia o el consumo de energía.	No	El sistema es eficiente en el consumo de energía para reducir costos operativos.
Qué le gustaría mejorar de la transmisión en términos de mantenimiento	Que sea fácil y no estar reponiendo piezas o accesorios	El sistema es fácil de mantener y no requiere cambios frecuentes de piezas.
Expectativas	La transmisión será utilizada para ambos trabajos	El sistema se ajusta a las dos máquinas.
	Que sea durable	El sistema es de materiales resistentes a la carga y ambiente de trabajo.
	Fácil operación y mantenimiento	El sistema es intuitivo y minimiza los requerimientos de mantenimiento.
	Relación costo-beneficio a largo plazo	El sistema maximiza la relación costo-beneficio a largo plazo en términos de eficiencia y durabilidad.
Velocidad variable	Estaría mejor por la forma de trabajo de los materiales	El sistema ofrece velocidad variable para adaptarse a diferentes tipos de materia prima.

Es fácil usar el producto existente	Es fácil Un poco de capacitación es recomendable para hacer eficiente el uso	El sistema es de fácil manejo y control intuitivo.
Diseño de transmisión	Control manual detallado	El sistema ofrece un control manual para dar al usuario un mayor control sobre el equipo.
Importancia de que el sistema sea de bajo peso	Sería mucho mejor que fuera de bajo peso	El sistema es fácil de manipular y transportar.

### 3.2.2 Necesidades organizadas en una jerarquía

Las necesidades se organizaron por conjuntos de necesidades primarias, las cuales se caracterizan con un conjunto de necesidades secundarias [9]. La Tabla 5 muestra la jerarquía de necesidades del cliente, cada necesidad primaria se acompaña de sus correspondientes necesidades secundarias, con una calificación de importancia (\* = baja, \*\* = media, \*\*\* = alta).

*Tabla 5. Jerarquía de necesidades primarias y secundarias*

<b>Necesidades primarias y secundarias (con nivel de importancia)</b>
<p><b>El sistema de transmisión tiene un buen desempeño operativo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema presenta un desempeño confiable ante largos periodos de inactividad. (***)</li> <li>• El sistema es capaz de funcionar de manera efectiva durante largos periodos de tiempo. (***)</li> <li>• El sistema garantiza un funcionamiento continuo. (***)</li> <li>• El sistema soporta un uso periódico y repetitivo, garantizando un funcionamiento confiable. (**)</li> <li>• El sistema ofrece una operación confiable. (***)</li> <li>• El sistema es estable y se mantiene ajustado durante el funcionamiento. (**)</li> <li>• El sistema soporta las condiciones de trabajo adversas en el campo. (**)</li> <li>• El sistema es robusto y capaz de manejar cargas pesadas sin riesgo de daños. (***)</li> </ul>
<p><b>El sistema de transmisión tiene buena capacidad y eficiencia de trabajo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema es capaz de manejar el volumen de trabajo esperado durante el periodo de uso. (***)</li> <li>• El sistema maneja eficientemente el volumen de producción previsto. (***)</li> </ul>

- El sistema es capaz de funcionar eficientemente para un uso intenso. (\*\*\*)
- El sistema optimiza el rendimiento de las máquinas agrícolas. (\*\*)
- El sistema ofrece la potencia adecuada y desempeño constante para un molido uniforme. (\*\*\*)
- El sistema se ajusta a las variaciones de carga y volumen de trabajo. (\*\*\*)
- La transmisión se ajusta a las variaciones de carga y volumen de trabajo. (\*\*)
- El sistema puede tener capacidad de carga y resistencia. (\*\*)

#### **El sistema de transmisión es adaptable y flexible**

- El sistema permite utilizar un solo motor para accionar diferentes máquinas. (\*\*\*)
- El sistema se ajusta a las dos máquinas. (\*\*)
- El sistema es intercambiable. (\*\*\*)
- El sistema ofrece velocidad variable para adaptarse a diferentes tipos de materia prima. (\*\*\*)
- El sistema ofrece opciones de potencia variable, para adaptarse a diferentes requerimientos de las máquinas. (\*\*)

#### **El sistema de transmisión presenta facilidad de uso y control**

- El sistema es intuitivo y fácil de usar para los operadores. (\*\*\*)
- El sistema es de fácil manejo y control intuitivo. (\*\*\*)
- El sistema ofrece un control manual para dar al usuario un mayor control sobre el equipo. (\*\*)
- El sistema ofrece un control manual. (\*\*)
- El sistema facilita la operación y permite un arranque de motor sencillo y confiable. (\*\*\*)
- El sistema ofrece una puesta en marcha sin fallas. (\*\*\*)

#### **El sistema de transmisión presenta durabilidad**

- El sistema es duradero. (\*\*\*)
- El sistema es duradero y minimiza los requerimientos de mantenimiento. (\*\*\*)
- El sistema minimiza los requerimientos de mantenimiento. (\*\*\*)
- El sistema tiene una estructura que minimiza la necesidad de mantenimiento regular. (\*\*)
- El sistema es fácil de mantener y no requiere cambios frecuentes de piezas. (\*\*)
- El sistema es confiable y resistente que no utiliza bandas. (\*\*\*)

- El sistema es de materiales resistentes a la carga y ambiente de trabajo. (\*\*\*)
- El sistema evita gastos en piezas costosas. (\*\*)

**El sistema de transmisión presenta eficiencia energética y económica**

- El sistema brinda la eficiencia operativa y energética. (\*\*\*)
- El sistema es eficiente en el consumo de energía para reducir costos operativos. (\*\*)
- El sistema ofrece una rentabilidad favorable, reduciendo costos de mantenimiento. (\*\*\*)
- El sistema maximiza la relación costo-beneficio a largo plazo en términos de eficiencia y durabilidad. (\*\*\*)

**El sistema de transmisión tiene un buen diseño estructural**

- El sistema es fácil de manipular y transportar. (\*\*\*)
- El sistema es de materiales resistentes a la carga y ambiente de trabajo. (\*\*)
- El sistema presenta una estructura estable y balanceada para su operación. (\*\*)

Posteriormente, se realizó la Tabla 6 para establecer la importancia de las necesidades de los clientes, identificadas anteriormente [9]. Esta importancia se estableció, de acuerdo con lo dicho en la entrevista presencial, con los usuarios.

*Tabla 6. Importancia de las necesidades del cliente.*

Núm.		Necesidad	Importancia
1	El sistema	presenta un desempeño confiable ante largos periodos de inactividad y funcionamiento continuo.	5
2	El sistema	es capaz de operar eficazmente durante jornadas prolongadas de trabajo.	5
3	El sistema	mantiene un desempeño estable bajo condiciones de carga variables.	5
4	El sistema	soporta un uso periódico y repetitivo sin comprometer su rendimiento.	4
5	El sistema	es robusto y resistente ante cargas pesadas o condiciones de campo exigentes.	5
6	El sistema	requiere poco mantenimiento y minimiza la necesidad de refacciones.	4

7	El sistema	es intercambiable y adaptable entre distintos equipos.	5
8	El sistema	es fácil de operar, intuitivo y de control sencillo para el usuario.	4
9	El sistema	es fácil de manipular, transportar e instalar.	4
10	El sistema	optimiza la eficiencia de las máquinas agrícolas conectadas.	4
11	El sistema	ofrece la potencia necesaria para desgranar.	5
12	El sistema	ofrece la potencia necesaria para moler forraje.	5
13	El sistema	se adapta a variaciones de carga, velocidad y tipo de material trabajado.	5
14	El sistema	es duradero y conserva su funcionalidad a lo largo del tiempo.	4
15	El sistema	optimiza el rendimiento de las máquinas agrícolas conectadas.	5
16	El sistema	maneja diferentes volúmenes de producción.	5
17	El sistema	permite un arranque rápido y confiable del motor.	5
18	El sistema	es eficiente en el consumo de energía, reduciendo los costos operativos.	4
19	El sistema	evita gastos innecesarios en piezas o mantenimiento costoso.	4
20	El sistema	ofrece un control manual accesible que permite establecer ajustes de velocidad.	5
21	El sistema	mantiene una estructura estable, balanceada y segura durante el funcionamiento.	5

### 3.2.3 Establecer especificaciones objetivo

Una vez que han sido identificadas las necesidades del cliente, se establecen las especificaciones objetivo, en donde el primer paso consiste en elaborar una lista de métricas que reflejen directamente el grado en que el producto satisface las necesidades del cliente. La relación entre estas necesidades y las métricas es fundamental para establecer las especificaciones del producto. Se parte de la suposición de que es posible traducir las necesidades del cliente en especificaciones precisas y medibles, y que al cumplirlas se logrará satisfacer al cliente [9]. A continuación, en la Tabla 7 se muestran las métricas, de acuerdo con cada necesidad del cliente.

**Tabla 7. Lista de métricas de las necesidades del cliente.**

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. de necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Importancia</b>	<b>Unidades</b>
<b>1</b>	1, 14	Tiempo de vida útil del producto	4	Años
<b>2</b>	2, 4	Tiempo de operación continua sin fallas ni sobrecalentamiento	5	h
<b>3</b>	13, 16	Porcentaje de producción cumplida respecto al objetivo	5	%
<b>4</b>	4, 14	Número de ciclos de trabajo antes de mantenimiento	4	Ciclos
<b>5</b>	5, 14	Resistencia al agua, polvo y temperatura	5	Horas de exposición, % humedad
<b>6</b>	6, 19	Costo de mantenimiento	5	MXN/año
<b>7</b>	7, 9	Facilidad de adaptación a diferentes máquinas	4	Lista
<b>8</b>	7, 8	Nivel de facilidad de uso	3	Subjetiva
<b>9</b>	9	Peso del producto	3	Kg
<b>10</b>	10, 11, 12	Consumo de energía durante la operación	4	kW/h
<b>11</b>	11, 12	Potencia de salida del producto	5	hp
<b>12</b>	3, 15, 21	Rendimiento del producto en condiciones agrícolas	5	kg/h
<b>13</b>	13, 16, 20	Tiempo de ajuste del producto para diferentes volúmenes	3	s
<b>14</b>	17	Tiempo de arranque del producto	4	s
<b>15</b>	18	Costo total de operación del producto	4	MXN/ h
<b>16</b>	5, 6, 14, 19	Tiempo medio entre mantenimientos	4	Meses
<b>17</b>	20, 13	Rango de ajuste de velocidad del producto	5	rpm
<b>18</b>	21, 15	Nivel de vibración	3	m/s <sup>2</sup>

Después de identificar las métricas para cada necesidad, se realizó una matriz (Figura 32), la cual representa la relación entre necesidades y métricas. Un punto en una celda de la matriz significa que la necesidad y la métrica asociada con la celda están relacionadas, el rendimiento relativo a la métrica influirá en qué grado el producto satisface la necesidad del cliente [9].

Necesidad		Métrica																				
		Tiempo de vida útil del producto.	Tiempo de operación continua sin fallas ni sobrecalentamiento.	Porcentaje de producción cumplida respecto al objetivo.	Número de ciclos de trabajo antes de mantenimiento.	Resistencia al agua, polvo y temperatura.	Costo y frecuencia de mantenimiento.	Facilidad de adaptación a diferentes máquinas.	Tiempo de configuración.	Peso del producto.	Consumo de energía durante la operación.	Potencia de salida del producto.	Rango de ajuste del producto.	Eficiencia del producto.	Rendimiento del producto en condiciones agrícolas.	Velocidad de ajuste del producto para diferentes volúmenes.	Facilidad de arranque del producto.	Costo total de operación del producto.	Tiempo medio entre mantenimientos.	Rango de ajuste de velocidad del producto.	Aceleración de la vibración reducida.	
1	Presenta durabilidad ante largos periodos de inactividad.	●																				
2	Tiene la capacidad de funcionar sin fallas ni sobrecalentamiento.		●																			
3	Maneja eficientemente el volumen de producción.			●																		
4	Tiene durabilidad para el uso intenso diario.				●																	
5	Es resistente a condiciones adversas en el campo.					●	●															
6	Requiere mantenimiento mínimo o nulo.					●	●															
7	Presenta adaptabilidad para operar en dos tipos de máquinas.							●	●													
8	Es de fácil uso y operación intuitiva.								●													
9	Es ligera para facilitar manipulación.							●		●												
10	Maximiza la eficiencia energética para reducir costos operativos.									●												
11	Tiene una potencia adecuada para desgranar.									●	●											
12	Tiene una potencia adecuada para moler forraje.										●											
13	Ofrece variaciones de carga.											●									●	
14	Ofrece una buena eficiencia.												●									
15	Optimiza el rendimiento de las máquinas agrícolas.													●								●
16	Se adapta a diferentes volúmenes de trabajo.														●							
17	Brinda un arranque fácil de manejar.															●						
18	Reduce costos operativos.																●					
19	Minimiza la necesidad de mantenimiento.																	●				
20	Permite establecer ajustes de velocidad.											●									●	
21	Tiene la capacidad de reducir la vibración de la máquina.													●								●

Figura 32. Matriz de necesidades-métricas.

El siguiente paso consistió en realizar una búsqueda externa de información enfocada en identificar soluciones empleadas por usuarios líderes dentro del ámbito agrícola. Este análisis tuvo como finalidad obtener los parámetros de operación necesarios para establecer criterios de diseño y selección de componentes del sistema de transmisión, en función de las condiciones de trabajo de las máquinas analizadas.

Una vez seleccionadas las referencias de máquinas para recabar información de ellas, se procedió a realizar los cálculos necesarios para determinar los requerimientos operativos de las máquinas involucradas, lo que permitió establecer los parámetros precisos sobre los cuales se desarrolló el diseño detallado de los componentes.

Para el correcto funcionamiento del sistema de transmisión a emplear es necesario calcular la velocidad y el torque de los ejes involucrados en cada una de las máquinas a emplear; en este caso el eje del motor y del mecanismo de desgranado o picado, de la

máquina desgranadora y picadora de forraje respectivamente. Para esto se realizaron los siguientes cálculos, considerando que el mecanismo de transmisión actualmente utilizado en dichas máquinas es por bandas tipo V.

A continuación, se presentan los cálculos de la transmisión utilizada en la máquina picadora de forraje, especificando velocidad y potencia requeridas, para obtener la velocidad de las poleas, la potencia de salida y el par de torsión. La Figura 33 corresponde a la máquina sobre la cual se está realizando el análisis, considerando sus dimensiones y especificaciones del motor utilizado.

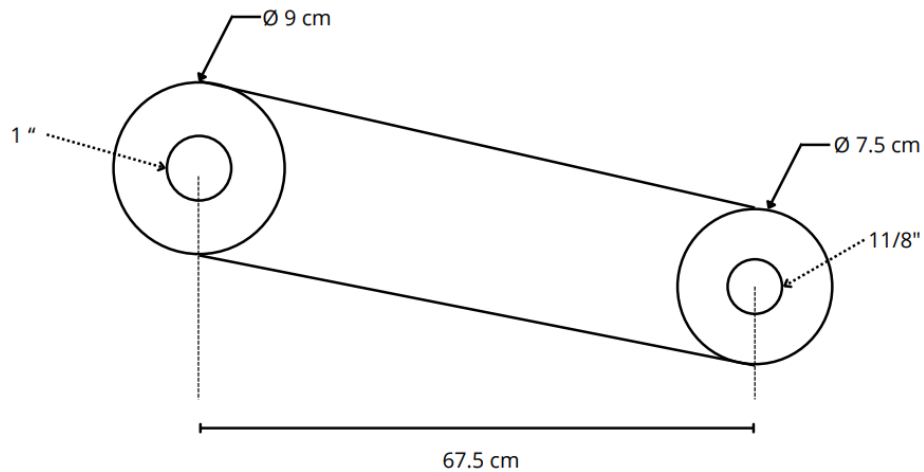


*Figura 33. Máquina picadora de forraje, utilizada para pruebas.*

Datos:

➤ <b>Picadora:</b> 2500 rpm	➤ <b>Motor:</b> Siemens® Monofásico 3 hp
➤ <b>Horas de uso:</b> 2 h seguidas, descanso de 20 min (6 - 8 h de uso por día)	➤ <b>Eficiencia nominal (<math>\eta</math>):</b> 78.5%
➤ <b>Bandas:</b> Doble, Tipo V A61	➤ <b>Velocidad rotor:</b> 3520/3470 rpm

En la Figura 34 se observa la disposición de poleas correspondiente a la máquina picadora sobre la cual se está realizando el análisis, considerando dimensiones de poleas, ejes y distancia entre centros.



**Figura 34. Disposición de poleas en picadora de forraje.**

Inicialmente se realizó el cálculo de las velocidades de salida de las poleas con los datos que se muestran a continuación:

$w_1 = 3495 \text{ rpm}$  (Polea 1 del motor)

$w_2 = ?$  (Polea 2 mecanismo de picado)

$D_1 = 7.5 \text{ cm}$  (Polea 1)

$D_2 = 9 \text{ cm}$  (Polea 2)

de acuerdo con la ecuación (2-9) se tiene que para calcular la velocidad de la polea 2:

$$w_2 = w_1 \times \frac{D_1}{D_2}$$

$$w_2 = 3495 \text{ rpm} \times \frac{7.5 \text{ cm}}{9 \text{ cm}} = 2912.5 \text{ rpm}$$

Obteniendo una velocidad para la polea del mecanismo de picado de 2912.5 rpm.

Dentro de los datos requeridos para el prediseño se requiere de la potencia de salida, la cual de acuerdo con la ecuación (2-10) se tiene lo siguiente:

$$P_o = P_i * \eta$$

Donde:

➤  $P_i = 3 \text{ hp}$

➤  $\eta = 78.5 \%$

$$P_o = 3 * 0.785 = 2.355 \text{ hp}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

$$P_o = 2.355 \text{ hp} * 746 \text{ W} = 1756.83 \text{ W}$$

Con los resultados obtenidos se calculó el par de torsión ejercido en el eje del motor y del mecanismo de picado, de acuerdo con la ecuación 2-18:

$$T = P_o/n$$

Donde la potencia y velocidad de giro del eje del motor son:

➤  $P_o = 1756.83 \text{ W}$

➤  $n = 366 \text{ rad/s}$

$$n = 3495 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 366 \text{ rad/s}$$

$$T = \frac{1756.83 \text{ N} \frac{m}{s}}{366 \frac{rad}{s}} = 4.8 \text{ N} \cdot m$$

La potencia y velocidad de giro del eje del mecanismo de picado son:

➤  $P_o = 1756.83 \text{ W}$

➤  $n = 305 \text{ rad/s}$

➤  $\eta \text{ bandas V} = 80 \%$

$$n = 2912.5 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 305 \text{ rad/s}$$

$$T = \frac{\left(1756.83 \text{ N} \frac{m}{s}\right) * (0.8)}{305 \frac{rad}{s}} = 4.6 \text{ N} \cdot m$$

Ahora, se presentan los cálculos realizados de la transmisión utilizada en la máquina desgranadora de maíz, especificando velocidad y potencia requeridas, para obtener la velocidad de las poleas, la potencia de salida y el par de torsión. La Figura 35 corresponde a la máquina sobre la cual se está realizando el análisis, considerando las dimensiones y especificaciones del motor utilizado.

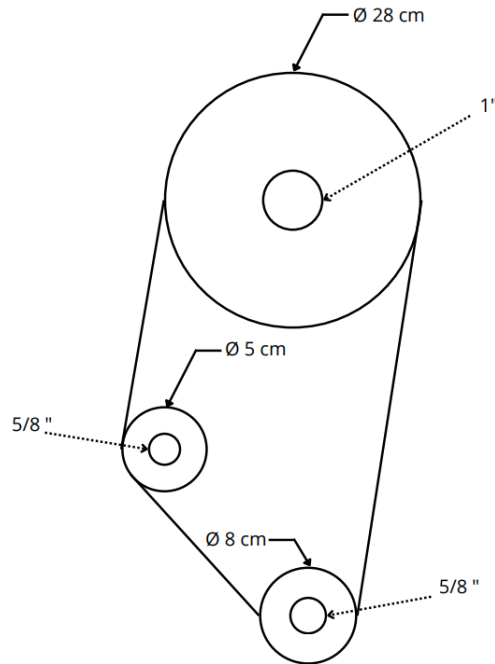


*Figura 35. Máquina desgranadora de maíz, utilizada en pruebas.*

Datos:

➤ <b>Desgranadora:</b> 1800 rpm	➤ <b>Motor:</b> Siemens® Monofásico 1.5 hp
➤ <b>Horas de uso:</b> 1.5 h seguidas, descanso de 30 min (6 h de uso al día)	➤ <b>Eficiencia nominal (<math>\eta</math>):</b> 76%
➤ <b>Bandas:</b> Tipo V A53	➤ <b>Velocidad rotor:</b> 1740/1720 rpm

En la Figura 36 se observa la disposición de poleas correspondiente a la máquina desgranadora sobre la cual se está realizando el análisis, considerando dimensiones de poleas, ejes y distancia entre centros.



**Figura 36. Disposición de poleas en desgranadora de maíz.**

Inicialmente se realizó el cálculo de las velocidades de salida de las poleas con los datos que se muestran a continuación:

$w_1 = 1730 \text{ rpm}$  (Polea 1 del motor)

$w_2 = ?$  (Polea 2 intermedia)

$D_1 = 8 \text{ cm}$  (Polea 1)

$D_2 = 5 \text{ cm}$  (Polea 2)

de acuerdo con la ecuación (2-9) se tiene que para calcular la velocidad de la polea 2:

$$w_2 = w_1 \times \frac{D_1}{D_2}$$

$$w_2 = 1730 \text{ rpm} \times \frac{8 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 2768 \text{ rpm}$$

Después de calculó la velocidad de salida de la polea correspondiente al mecanismo de desgranado con los datos que se muestran a continuación:

$w_2 = 2768 \text{ rpm}$  (Polea 2 intermedia)

$w_3 = ?$  (Polea 3 mecanismo de desgranado)

$D_2 = 5 \text{ cm}$  (Polea 2)

$D_3 = 28 \text{ cm}$  (Polea 3)

de acuerdo con la ecuación (2-9) se tiene que para calcular la velocidad de la polea 2:

$$w_3 = w_2 \times \frac{D_2}{D_3}$$

$$w_3 = 2768 \text{ rpm} \times \frac{5 \text{ cm}}{28 \text{ cm}} = 494 \text{ rpm}$$

Obteniendo una velocidad para la polea de la polea intermedia de 2768 rpm y de la polea del mecanismo de desgranado de 494 rpm.

A continuación, se calculó la potencia de salida, la cual de acuerdo con la ecuación (2-10) se tiene lo siguiente:

$$P_o = P_i * \eta$$

Donde:

➤  $P_i = 1.5 \text{ hp}$

➤  $\eta = 76 \%$

$$P_o = 1.5 * 0.76 = 1.14 \text{ hp}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

$$P_o = 1.14 \text{ hp} * 746 \text{ W} = 850.44 \text{ W}$$

Con los resultados obtenidos se calculó el par de torsión ejercido en el eje del motor y del mecanismo de desgranado, de acuerdo con la ecuación 2-18:

$$T = P_o/n$$

Donde la potencia y velocidad de giro del eje del motor son:

➤  $P_o = 850.44 \text{ W}$

➤  $n = 181 \text{ rad/s}$

$$n = 1730 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 181 \text{ rad/s}$$

$$T = \frac{850.44 \text{ N} \frac{m}{s}}{181 \frac{rad}{s}} = 4.7 \text{ N} \cdot m$$

La potencia y velocidad de giro del eje del mecanismo de desgranado son:

- $P_o = 850.44 \text{ W}$
- $n = 51.7 \text{ rad/s}$
- $\eta \text{ bandas V} = 80 \%$

$$n = 494 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 51.7 \text{ rad/s}$$

$$T = \frac{(850.44 \text{ N} \frac{m}{s}) * (0.8)}{51.7 \frac{rad}{s}} = 13.1 \text{ N} \cdot m$$

De acuerdo con los requerimientos de torque y velocidad de rotación obtenidos previamente para las máquinas agrícolas (la picadora de forraje y la desgranadora de maíz), se procedió a calcular la potencia necesaria para su operación. Estos cálculos permitieron determinar la potencia mínima que debe tener el motor eléctrico a seleccionar, asegurando que pueda cumplir con las exigencias de ambas máquinas.

La potencia se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{T \times \omega}{1000} \text{ kW} \quad (2-20)$$

Donde

$T = \text{Torque [N} \cdot m]$

$\omega = (2\pi \times \text{rpm}) / 60 = \text{velocidad angular [rad/s]}$

Para la picadora de forraje se tiene:

Torque = 4.6 N·m

Velocidad = 2912.5 rpm

$$\omega = (2\pi \times 2912.5) / 60 = 305 \text{ rad/s}$$

$$P_1 = \frac{4.6 \times 305}{1000} = 1.403 \text{ kW}$$

$$1.403 \text{ kW} \times 1.341 = 1.882 \text{ hp}$$

Para la desgranadora de maíz se tiene:

Torque = 13.1 N·m

Velocidad = 494 rpm

$$\omega = (2\pi \times 494) / 60 = 51.72 \text{ rad/s}$$

$$P_2 = \frac{13.1 \times 51.72}{1000} = 0.678 \text{ kW}$$

$$0.678 \text{ kW} \times 1.341 = 0.910 \text{ hp}$$

Con base en los cálculos realizados, se determinó que la máquina con mayor exigencia de potencia es la picadora de forraje, con un requerimiento de 1.882 hp. Considerando que los motores eléctricos presentan una eficiencia típica entre el 75 % y el 80 %, fue necesario ajustar la potencia nominal requerida para asegurar un funcionamiento adecuado. Al aplicar este rango de eficiencia, se obtuvo que la potencia mínima del motor debe estar entre 2.35 hp y 2.51 hp. Por lo tanto, se seleccionó un motor eléctrico de 3 hp, ya que este valor proporciona un margen de seguridad suficiente para garantizar el desempeño confiable del sistema en ambas aplicaciones, tanto en la picadora de forraje como en la desgranadora de maíz.

### 3.2.4 Despliegue de la Función de Calidad

Una vez identificados los requerimientos técnicos y operacionales de las máquinas, se elaboró una adaptación de la Fase I del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) con el fin de vincular de manera estructurada las necesidades del usuario (voz del cliente) con las características técnicas del sistema (voz del ingeniero) [9].

La adaptación de la Casa de la Calidad se elaboró con el propósito de disponer de una herramienta estructurada que permitiera traducir la voz del cliente (necesidades y expectativas de usuarios del sector agrícola) en características técnicas medibles del sistema de transmisión (Figura 37). Al relacionar cada requerimiento del usuario con métricas técnicas y asignar ponderaciones de importancia, la Casa de la calidad facilitó la

priorización de variables técnicas y respaldó la toma de decisiones de diseño con criterios trazables. En esta aplicación no se incluyó la comparación con productos de la competencia, debido a que el objetivo fue identificar y ponderar los parámetros de diseño más relevantes. Para facilitar la interpretación de la matriz se tiene la siguiente nomenclatura en la Tabla 8.

**Tabla 8. Nomenclatura QFD**

<b>Concepto</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Concepto</b>	<b>Símbolo</b>
Fuerte Relación Positiva	<b>++</b>	Valor meta	<b>=</b>
Relación Positiva	<b>+</b>		
Sin relación	<b>(espacio en blanco)</b>		
Relación Negativa	<b>-</b>	Valor preferido por encima de la meta	<b>↑</b>
Fuerte Relación Negativa	<b>--</b>		
Relación Fuerte	<b>9</b>		
Relación Media	<b>3</b>	Valor preferido por debajo de la meta	<b>↓</b>
Relación Débil	<b>1</b>		
Relación Sin relación	<b>(espacio en blanco)</b>		

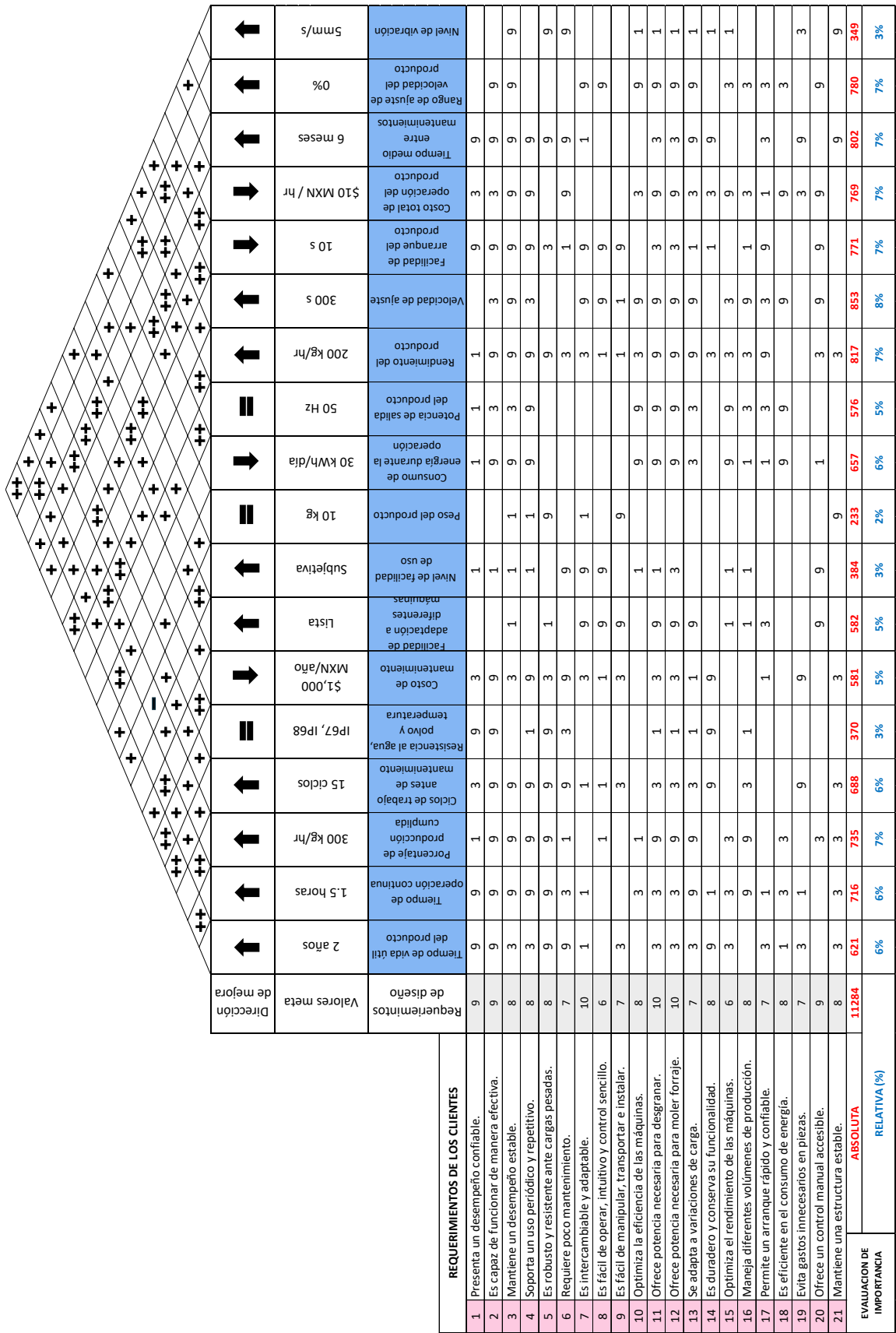


Figura 37. Adaptación de la casa de la calidad para el sistema de transmisión de potencia adaptable.

La matriz organizó los requerimientos del cliente en la sección izquierda y las métricas técnicas en la parte superior; en el cuerpo central se representó el grado de relación entre ambos, lo que permitió calcular la importancia relativa de cada característica técnica. A partir del análisis de la matriz se identificaron los aspectos esenciales que debe incorporar el sistema, destacando aquellos con mayor peso relativo (5%, 6%, 7% y 8%), estos parámetros representan las áreas críticas de diseño que deben optimizarse para mejorar la eficiencia, confiabilidad y durabilidad del sistema, por lo que se consideraron como prioritarios y se les dio especial importancia durante el proceso de diseño y toma de decisiones del prototipo.

Adicionalmente, el panel superior de correlación permitió identificar interacciones positivas o negativas entre características técnicas, evidenciando compromisos de diseño. Este análisis contribuyó a anticipar efectos cruzados entre variables y a orientar la selección de soluciones equilibradas y justificables en el desarrollo del prototipo.

Como resultado de la primera matriz se obtiene una evaluación de importancia, calculada como la suma de los productos entre la prioridad asignada a cada requerimiento del cliente y el valor de relación asociado con cada requerimiento técnico. Posteriormente, ese total se normaliza mediante la frecuencia absoluta (FA) para obtener la frecuencia relativa (FR), tal como se ejemplifica a continuación.

En primer lugar, se calculó la frecuencia  $F_{m,n}$  en cada celda de la matriz de relaciones, multiplicando la prioridad del requerimiento del cliente (fila  $m$ ) por el valor de relación con el requerimiento técnico (columna  $n$ ):

$$F_{m,n} = \text{Prioridad}_m * \text{Cómo}_{m,n}$$

Como ejemplo, para la primera columna ( $n = 1$ ) y la primera fila ( $m = 1$ ), se tiene una prioridad de 9 y una relación de 9, por lo tanto:

$$F_{1,1} = \text{Prioridad}_1 * \text{Cómo}_{1,1} = 9 * 9 = 81$$

Después, para cada requerimiento técnico (cada columna), se calculó la suma de frecuencias  $SF_n$  sumando todos los valores  $F_{m,n}$  correspondientes:

$$SF_n = \sum_{i=1}^m F_{i,n}$$

Para la columna 1 ( $n = 1$ ), la suma de las frecuencias calculadas fue:

$$SF_1 = 621$$

Posteriormente, la FA se obtuvo sumando las  $SF_n$  de todas las columnas (es decir, todos los requerimientos técnicos):

$$FA = \sum_{j=1}^n SF_n$$

De este modo, el valor total fue:

$$FA = 11,284$$

Finalmente, la FR de cada requerimiento técnico se determinó normalizando cada  $SF_n$  respecto a la FA total:

$$FR_n = \frac{SF_n}{FA} * 100\%$$

Para la primera columna, usando los valores anteriores:

$$FR_1 = \frac{621}{11,284} = 0.055 \sim 6.00\%$$

### 3.2.5 Generar conceptos de producto

El método para la generación de conceptos, descompone un problema complejo en subproblemas más sencillos. Los conceptos de solución se identifican para los subproblemas mediante procedimientos de búsqueda interna y externa, se utilizan árboles de clasificación y tablas de combinación de conceptos para explorar de manera sistemática el espacio de soluciones y para integrar las soluciones del subproblema en una solución global [9].

A continuación, se muestra el diagrama funcional de una transmisión para maquinaria agrícola, primeramente, se muestra un diagrama de caja negra (Figura 38), en donde se dividió en subfunciones, mostrando lo que los elementos de una máquina agrícola pueden hacer para implementar la transmisión de potencia, se pueden visualizar las entradas y salidas que tiene la transmisión en este tipo de maquinaria. Después en la Figura 39, se dividió la caja negra en subfunciones, mostrando lo que los elementos de la maquinaria, pueden hacer para implementar la función general de la transmisión de potencia.

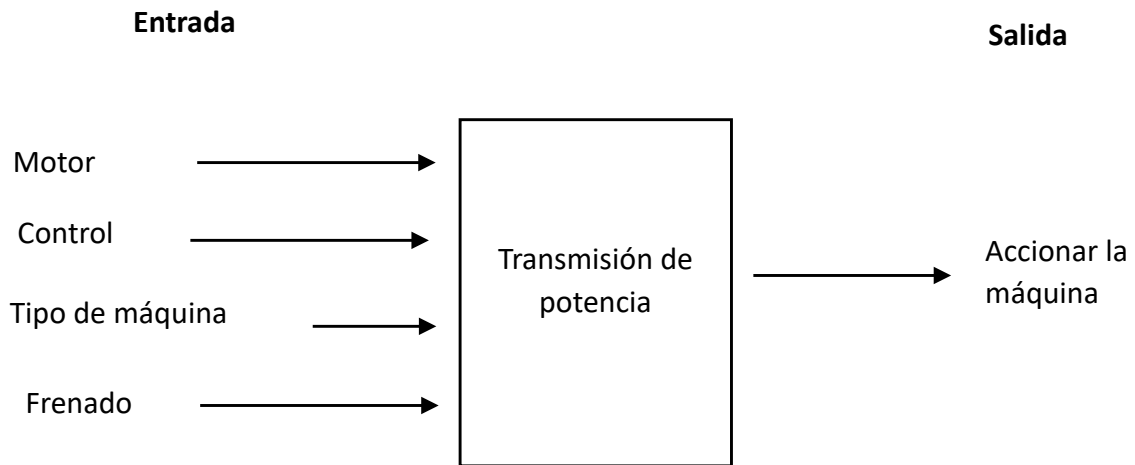


Figura 38. Diagrama de caja negra.

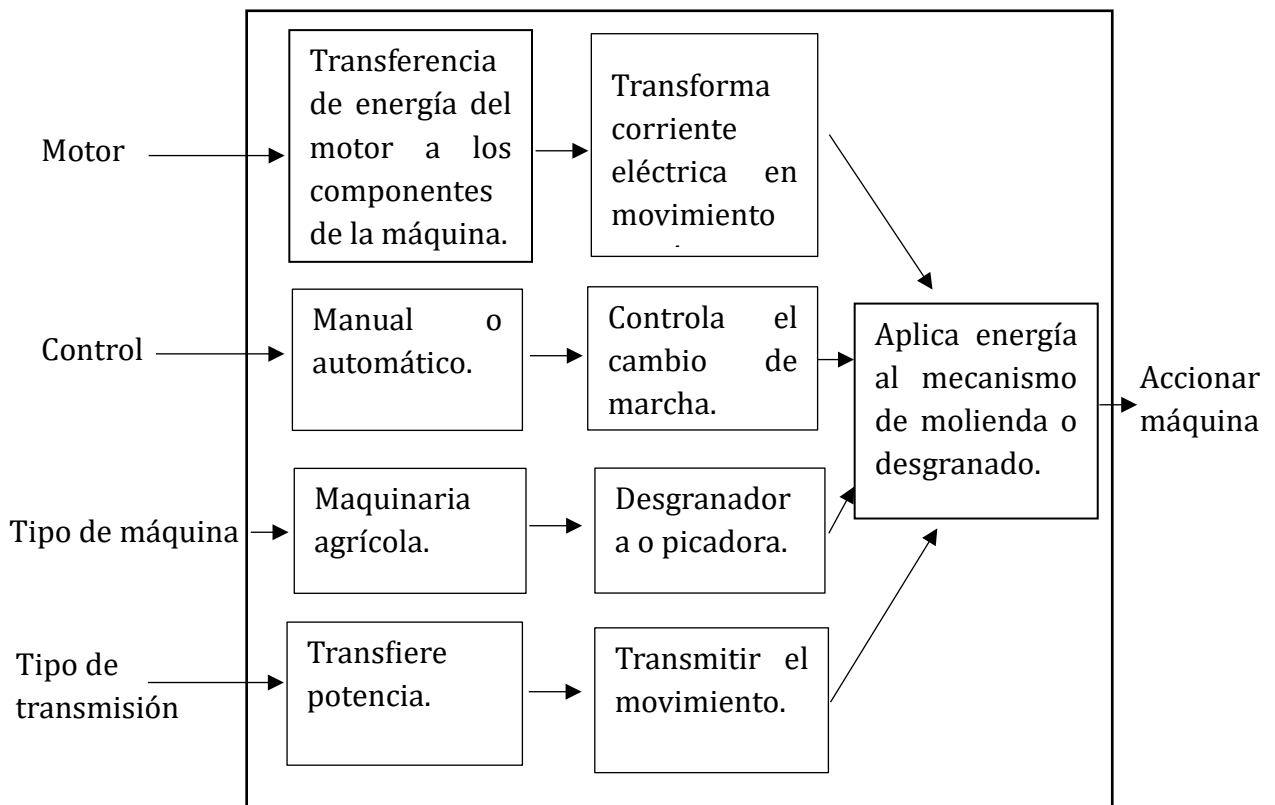
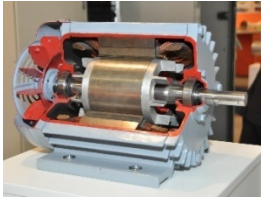
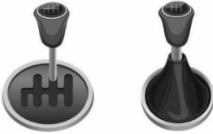








Figura 39. Subfunciones de la caja negra.

Después de obtener el funcionamiento general del producto, el siguiente paso es realizar una búsqueda destinada a hallar soluciones existentes al problema general y a los subproblemas identificados [9], en este caso se realizó una búsqueda externa de los elementos involucrados en el accionamiento de maquinaria agrícola, dentro de los componentes que se utilizan se encuentra un motor, un control y la transmisión de

potencia, de estos se realizó una tabla de combinación de conceptos (Figura 40) en la cual se pueden observar los diferentes tipos de elementos encontrados en el mercado, que se encuentran involucrados directamente con la función de transmisión de potencia, con el objetivo de tener combinaciones de fragmentos de solución.

Motor	Control	Tipo de transmisión
<p data-bbox="375 470 496 499"><b>Eléctrico</b></p> 	<p data-bbox="808 562 902 592"><b>Manual</b></p> 	<p data-bbox="1101 470 1398 499">Transmisión por correa</p>  <p data-bbox="1101 663 1398 693">Transmisión por cadena</p> 
<p data-bbox="375 932 496 961"><b>Gasolina</b></p> 	<p data-bbox="781 940 927 970"><b>Automático</b></p> 	<p data-bbox="1092 898 1406 928">Transmisión por engrane</p>  <p data-bbox="1117 1094 1382 1123">Árbol de transmisión</p> 


*Figura 40. Combinación de conceptos para la transmisión adaptable a dos máquinas agrícolas.*

La tabla de combinación de conceptos, ayuda a identificar las soluciones potenciales al problema general, combinando un fragmento de cada columna. En la Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, se presentan diversas opciones de componentes para la transmisión, sin embargo, basándose en las necesidades del cliente identificadas en los pasos anteriores, el enfoque se enfatizó en analizar los conceptos que incluyan un motor eléctrico con control manual, variando el tipo de transmisión que se puede implementar.


Esto se debe a que el cliente ha expresado un interés particular en la eficiencia energética y la facilidad de operación que proporciona un motor eléctrico, así como en la capacidad de ajustar manualmente la transmisión según las condiciones de trabajo. Por lo tanto, se trabajó en desarrollar conceptos que combinen estas características con diferentes tipos

de transmisión, con el objetivo de ofrecer soluciones que se ajusten de manera óptima a sus necesidades.


**Tabla 9. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por correa.**

Motor	Control	Tipo de transmisión	Combinación
Eléctrico	Manual	Transmisión por correa	
		Transmisión por cadena	
Gasolina	Automático	Transmisión por engrane	
		Transmisión por árbol	

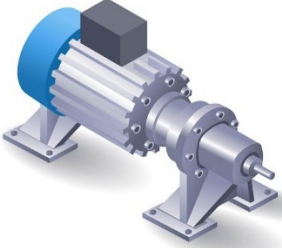
**Tabla 10. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por cadena.**

Motor	Control	Tipo de transmisión	Combinación
Eléctrico	Manual	Transmisión por cadena	
		Transmisión por engrane	
Gasolina	Automático	Transmisión por árbol	
		Transmisión por correa	

**Tabla 11. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por engranes.**

Motor	Control	Tipo de transmisión	Combinación
Eléctrico	Manual	Transmisión por engrane	
		Transmisión por cadena	
Gasolina	Automático	Transmisión por árbol	
		Transmisión por correa	

**Tabla 12. Concepto de solución, motor eléctrico, control manual y transmisión por árbol.**

Motor	Control	Tipo de transmisión	Combinación
Eléctrico	Manual	Transmisión por correa	
		Transmisión por cadena	
Gasolina	Automático	Transmisión por engrane	
		Transmisión por árbol	

### 3.2.6 Seleccionar conceptos de producto

La selección de un concepto es un proceso convergente y a menudo iterativo, que implica evaluar conceptos con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios relevantes. En este proceso, se compararon los aspectos fuertes y débiles de cada concepto para seleccionar uno o varios de ellos [9]. Se seleccionaron los conceptos, con base en las necesidades del cliente que se han identificado, la Tabla 13 presenta los conceptos seleccionados para cada tipo de transmisión, en donde se utilizó una escala nominal para una comprensión rápida de cada aspecto evaluado y así ayudar en la toma de decisiones.

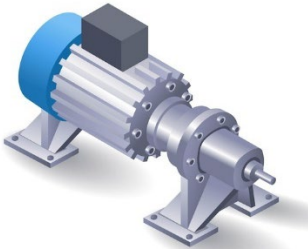
**Tabla 13. Información para selección de conceptos.**

Aspecto	Transmisión por Correa	Transmisión por Cadena	Transmisión por Engrane	Transmisión por árbol
Tiempo de operación continua	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado
Velocidad de ajuste a diferentes volúmenes	Baja	Baja	Moderada	Alta
Tiempo entre mantenimientos	Alto	Moderado	Moderado	Bajo
Facilidad de arranque	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
Rango de ajuste de velocidad	Bajo	Bajo	Moderado	Alto
Eficiencia Energética	Baja	Baja	Moderada	Alta
Tolerancia a Cargas Pesadas	Moderada	Alta	Buena	Buena
Durabilidad	Baja	Alta	Alta	Alta
Adaptabilidad a diferentes máquinas	Baja	Moderada	Moderada	Alta
Tiempo de vida útil	Bajo	Alto	Moderado	Moderado

A partir del análisis comparativo de los sistemas de transmisión, se determinó que la transmisión por árbol es la alternativa más viable técnica y funcionalmente, destacando por su alta eficiencia y durabilidad. Le siguen la transmisión por engrane, que ofrece buena precisión mecánica; la transmisión por cadena, con un rendimiento moderado; y, por último, la transmisión por correa, cuyo desempeño resulta limitado ante condiciones de carga y uso prolongado.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Tabla 13 se determinó que la transmisión por árbol constituye la alternativa más viable en términos técnicos y funcionales, debido a su amplio rango de ajuste de velocidad, alta eficiencia, adaptabilidad a distintas máquinas y durabilidad. Aunque la transmisión por cadena ofrece ventajas puntuales como buena tolerancia a cargas elevadas y vida útil considerable, su implementación se limita por aspectos prácticos del proyecto, principalmente mayor costo y mayores requerimientos de mantenimiento (tensado, lubricación y desgaste progresivo). En contraste, la transmisión por árbol proporciona un desempeño más equilibrado, con menor costo relativo frente a una transmisión por cadena equivalente y mantenimiento más controlable, lo que la hace más adecuada para un sistema adaptable y de operación continua. Es importante mencionar que también se seleccionó un control manual de la transmisión, ya que se pretende variar la velocidad de salida de la transmisión, para un mejor manejo del maíz y forraje, quedando el siguiente concepto seleccionado (Tabla 14):

**Tabla 14. Concepto seleccionado para transmisión.**

Motor	Control	Tipo de transmisión	Combinación
Eléctrico	Manual	Transmisión por árbol	

Después de identificar que la transmisión por árbol representa la alternativa más adecuada conforme a los requerimientos, se definió una configuración final compuesta por un motor eléctrico, control manual y una transmisión por árbol.

### 3.2.7 Evaluación de Conceptos

Una vez establecida la transmisión por árbol, fue necesario identificar los componentes complementarios del sistema de transmisión, en este sentido, los acoplamientos

representan elementos fundamentales, ya que permiten unir dos ejes con el propósito de transmitir potencia entre ellos, incluso en presencia de desalineaciones o vibraciones. La correcta selección del acoplamiento garantiza la fiabilidad del sistema, reduce el desgaste de los componentes y facilita el mantenimiento. En esta sección se realiza un análisis comparativo de tres métodos distintos para seleccionar el acoplamiento adecuado que conectará el eje de un motor eléctrico de 3 hp a los ejes de una máquina picadora de forraje y una desgranadora de maíz. Estos métodos se basan en distintas normas, criterios de diseño y catálogos industriales, y permiten establecer con claridad cuál es la opción más adecuada para el caso de estudio.

El principio que guía la selección de acoplamientos es asegurar que el componente elegido sea capaz de transmitir el par necesario de forma segura, considerando las condiciones de operación, el tipo de máquina, la potencia del motor y las velocidades involucradas. Este principio se basa en el cálculo del par de torsión y en la aplicación de un factor de servicio que contempla las condiciones reales de trabajo (impactos, vibraciones, carga variable, tipo de motor, etc.).

- Método 1: Selección según Momento de Torsión y Diámetro del Eje (Tupac Acoplamientos)

Este método, basado en el análisis de momento de torsión y el diámetro del eje, considera principalmente la potencia transmitida, la velocidad de rotación y un factor de servicio ajustado según el tipo de máquina y motor [39]. El par de torsión se calcula como:

$$M_t = \frac{716.2 \times N \times S}{n} \quad (2-21)$$

donde  $M_t$  es el momento de torsión (N·m),  $N$  la potencia (kW),  $S$  el factor de servicio y  $n$  la velocidad (rpm).

Se considera un factor de servicio de 1.5 para ambas máquinas [39], dado que son estacionarias y utilizan motor eléctrico. Los valores calculados fueron:

- Picadora de forraje:  $M_t = 6.11 \text{ N}\cdot\text{m}$

Potencia (N): 3 hp

Velocidad (n): 2912.5 rpm

Factor de servicio (S): Considerando que es una máquina mediana y semipesada, que utiliza un motor eléctrico,  $S=1.5$ .

De acuerdo con la ecuación 2-10 se tiene que:

$$P_o = P_i * \eta$$

Donde:

$$P_i = 3 \text{ hp}$$

$$\eta = 75.5 \%$$

$$P_o = 3 * 0.755 = 2.265 \text{ hp} = 1.689 \text{ kW}$$

$$Mt = \frac{716.2 * 1.689 * 1.5}{2912.5} = 0.623 \text{ Kg} \cdot m$$

$$1 \text{ kg} \cdot m = 9.8067 \text{ N} \cdot m$$

$$Mt = 0.623 * 9.8067 = 6.11 \text{ N} \cdot m$$

➤ Desgranadora de maíz:  $Mt = 36.02 \text{ N} \cdot m$

Potencia (N): 3 hp

Velocidad (n): 494 rpm

Factor de servicio (S): Considerando que es una mediana y semipesada, que utiliza un motor eléctrico,  $S=1.5$ .

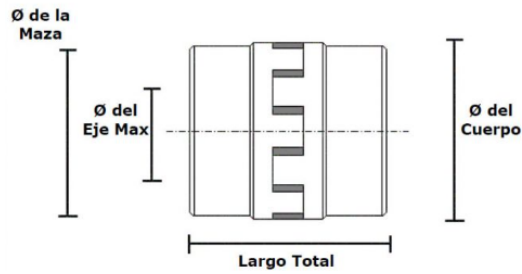
$$Mt = \frac{716.2 * 1.689 * 1.5}{494} = 3.673 \text{ Kg} \cdot m$$

$$1 \text{ kg} \cdot m = 9.8067 \text{ N} \cdot m$$

$$Mt = 3.673 * 9.8067 = 36.02 \text{ N} \cdot m$$

En función de estos valores, y considerando un eje de 25.4 mm de diámetro, se seleccionó el acoplamiento modelo Tupac M-2B (Figura 41), el cual admite hasta 30 mm de diámetro de eje y transmite desde 3.20 kg·m hasta 9.54 kg·m (~31.4 N·m hasta ~93.554 N·m) de par, siendo suficiente para ambas aplicaciones.

**Gráfico Ilustrativo  
MODELO CONVENCIONAL**



**Figura 41. Modelo Tupac M-B [39].**

- Método 2: Selección según la Norma AGMA 514.02 y Catálogos Industriales

Este método utiliza la norma AGMA 514.02, que proporciona factores de servicio específicos para distintas aplicaciones industriales [40]. La fórmula empleada es:

$$C_{nom} = \frac{9550 \times f \times P}{n}$$

donde  $C_{nom}$  es el par nominal del acoplamiento (N·m),  $f$  es el factor de servicio asociado al tipo de máquina,  $P$  la potencia (kW) y  $n$  número de revoluciones (rpm).

Los torques resultantes fueron mayores:

- Picadora de forraje: 16.62 N·m

Potencia (P): 1.689 kW

Velocidad (n): 2912.5 rpm

Factor de servicio (f): (equiparada a trituradora) 3.0

De acuerdo con la ecuación 2-10 se tiene que:

$$P_o = P_i * \eta$$

Donde:

$$P_i = 3 \text{ hp}$$

$$\eta = 75.5 \%$$

$$P_o = 3 * 0.755 = 2.265 \text{ hp}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

$$P_{out} = 2.265 \text{ hp} * 746 \text{ W} = 1689.69 \text{ W}$$

$$C_{nom} = \frac{9550 * 3 * 1.68969}{2912.5 \text{ rpm}} = 16.62 \text{ N} \cdot \text{m}$$

➤ Desgranadora de maíz: 63.33 N·m

Potencia (P): 1.689 kW

Velocidad (n):494 rpm

Factor de servicio (f): (equiparada a mezcladora) 2.0

$$C_{nom} = \frac{9550 * 2 * 1.68969}{494 \text{ rpm}} = 63.33 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con base en estos valores se analizaron distintos tipos de acoplamientos industriales:

Acoplamiento de fuelle (Figura 42): hasta 300 N·m



*Figura 42. Acoplamiento de fuelle ATEX [40].*

Acoplamiento de estrella (Figura 43): hasta 55000 N·m



*Figura 43. Acoplamiento de estrella ATEX [40].*

Acoplamiento flexible compacto (Figura 44): hasta 105000 N·m



Figura 44. Acoplamiento flexible compacto ATEX [40].

Aunque todos estos modelos son adecuados en capacidad, representan soluciones sobredimensionadas, lo que puede generar sobrecostos y mayor complejidad en el montaje.

- Método 3: Selección según Catálogo SKF® (Acoplamientos FRC)

Este método se basa en la selección a partir del catálogo SKF®, utilizando acoplamientos del tipo FRC, los cuales están diseñados para soportar cargas moderadas, vibraciones y desalineaciones [41].

De acuerdo con la tabla de factores de servicio para máquinas estacionarias del manual SKF, tanto la desgranadora como la picadora son consideradas máquinas medianas con carga normal por lo tanto se tiene un factor de servicio (FS) = 1.5.

- Cálculo de la potencia efectiva del motor:

$$P_{efectiva} = P_{nominal} \times \eta$$

$$P_{efectiva} = 2.2371 \text{ kW} \times 0.755 = 1.689 \text{ kW}$$

- Cálculo del torque de diseño para cada máquina:

$$T = \frac{P * 9550}{n}$$

- Para la picadora de forraje (n = 2912.5 rpm):

$$T_1 = \frac{1.689 * 9550}{2912.5} = 5.54 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- Para la desgranadora de maíz (n = 494 rpm):

$$T_2 = \frac{1.689 * 9550}{494} = 32.65 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- Cálculo de potencia de diseño:

$$P_{diseño} = 1.689 \times 1.5 = 2.53 \text{ kW}$$

De acuerdo con la tabla SKF®, el acoplamiento FRC tamaño 90 tiene capacidad de 4.19 kW y soporta hasta 3600 rpm (Figura 45), superior al valor de diseño de 2.53 kW, lo que lo hace adecuado para ambas aplicaciones.

Este acoplamiento destaca por su facilidad de instalación, uso de bujes desmontables y capacidad de absorber desalineaciones, lo que reduce el mantenimiento y mejora la vida útil del sistema.



**Figura 45. Acoplamiento FRC [41].**

A partir del análisis de los tres métodos, se concluye que el método basado en el catálogo SKF (Método 3) presenta la mejor relación entre capacidad técnica, facilidad de montaje y mantenimiento. Aunque los otros métodos proponen acoplamientos adecuados en términos de capacidad, pueden representar soluciones menos prácticas o más costosas. El acoplamiento FRC-90 resulta ideal por su compatibilidad con ambas máquinas, su capacidad de operación a alta velocidad y su facilidad de uso en aplicaciones estacionarias de carga media.

## Conceptos en función del acoplamiento

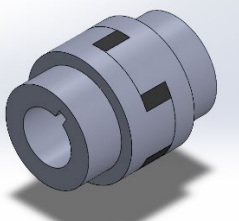
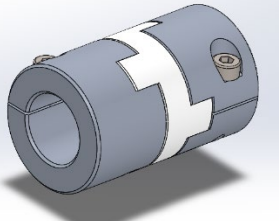
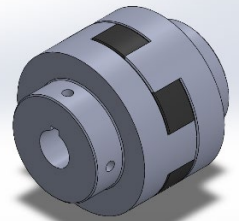
En el proceso de diseño y adaptación de sistemas de transmisión mecánica, la selección del concepto adecuado representa una fase crítica para garantizar la funcionalidad del conjunto. En este trabajo, la selección del acoplamiento fue el punto de partida para definir un conjunto de configuraciones viables que permitan conectar un motor eléctrico de 3 hp con dos tipos de maquinaria agrícola: una picadora de forraje y una desgranadora de maíz. La elección del acoplamiento no solo responde a la necesidad de transmitir torque de forma confiable, sino que también influye directamente en el tipo de sujeción de los ejes y en el diseño estructural de la base del motor. A continuación, se expone cómo esta decisión determinó la evaluación de diversos conceptos constructivos.

Partiendo de la evaluación técnica de tres métodos de selección de acoplamientos análisis por momento de torsión y diámetro del eje, norma AGMA 514.02 y catálogos industriales, y catálogo SKF® para acoplamientos FRC se identificaron distintas exigencias en cuanto a la transmisión de par, tolerancia a desalineaciones, vibraciones y facilidad de montaje. Esta variedad de enfoques permitió no solo comparar modelos de acoplamientos desde el punto de vista mecánico, sino también establecer criterios complementarios para la selección del concepto general del sistema: el tipo de acoplamiento influye directamente en el sistema de sujeción de los ejes, el diseño de la bancada y la alineación final entre el motor y las máquinas operativas.

Con base en el análisis del catálogo SKF® (método 3), se seleccionó el acoplamiento FRC-90, cuya capacidad de transmitir hasta 4.19 kW y soportar velocidades de hasta 3600 rpm lo posiciona como la opción más adecuada en términos de rendimiento y simplicidad de instalación. Este tipo de acoplamiento flexible permite tolerancias moderadas de desalineación angular y radial, por lo que influye directamente en el diseño conceptual de la base del motor y los mecanismos de sujeción.

A continuación, se presentan la Tabla 15 y la Tabla 16 en las que se muestran las diferentes configuraciones de acoplamientos tipo estrella con mordazas, todos fabricados con materiales similares pero que difieren en su método de sujeción y otras características técnicas.

**Tabla 15. Tabla comparativa de acoplamientos tipo estrella con mordazas.**

Característica	Acoplamiento con Cuña	Acoplamiento con Tornillos	Acoplamiento con Cuña y Tornillos
Tipo de Sujeción	Cuña única	Tornillos de fijación	Combinación de cuña y tornillos prisioneros
Material	Poliuretano/acero	Poliuretano/acero	Poliuretano/acero
Aplicación	Transmisiones simples	Máquinas de precisión	Cargas pesadas
Modelado CAD 3D			

Ya que se tiene seleccionado el tipo de acoplamiento, se compararon los aspectos fuertes y débiles de cada configuración de este acoplamiento, se seleccionaron los conceptos, con base en las necesidades del cliente y requerimientos técnicos y de operación que se han identificado. En la Tabla 16 se presentan los conceptos seleccionados para cada configuración de acoplamiento, en donde se utilizó una puntuación, siendo 1 la puntuación más baja y 5 la más alta, y así ayudar en la toma de decisiones.

**Tabla 16. Evaluación de conceptos.**

Concepto	Ventajas	Desventajas	Puntuación
Acoplamiento con Cuña	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporciona una transmisión segura y eficiente de torque.</li> <li>• Montaje sencillo y económico.</li> <li>• Para aplicaciones de baja y media potencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor sujeción del eje.</li> <li>• Requiere mecanizado preciso del chavetero.</li> </ul>	3
Acoplamiento con Tornillos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite una fijación firme mediante presión directa.</li> <li>• Facilita el montaje y desmontaje sin mecanizado del eje.</li> <li>• Ajuste rápido y mantenimiento sencillo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor capacidad de transmisión de torque.</li> <li>• Los tornillos pueden aflojarse con vibraciones.</li> </ul>	4

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere inspección periódica para asegurar sujeción.</li> </ul>	
Acoplamiento con Cuña y Tornillos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combina las ventajas de ambos sistemas, garantizando una unión segura y estable.</li> <li>• Alta capacidad de transmisión de torque.</li> <li>• Mayor resistencia a vibraciones y deslizamientos.</li> <li>• Adecuado para condiciones de operaciones exigentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montaje más complejo y mayor tiempo de instalación.</li> <li>• Requiere mecanizado del eje.</li> <li>• Costo ligeramente superior.</li> </ul>	5

De acuerdo con la evaluación de los conceptos analizados, considerando sus principales ventajas, desventajas y la puntuación obtenida, se determinó que el acoplamiento con cuña y tornillos representa la opción más adecuada para el sistema de transmisión propuesto. Esta configuración ofrece una mayor capacidad de transmisión de torque, mejor resistencia a vibraciones y una sujeción más estable entre los ejes, garantizando un desempeño confiable bajo las condiciones operativas establecidas. Asimismo, cumple con las especificaciones técnicas y de operación requeridas, lo que justifica su selección como la alternativa óptima para el diseño final del sistema.

Como tercer y último componente del sistema de transmisión, se procedió a la evaluación de diferentes configuraciones de bases para el motor, elemento fundamental dentro del conjunto mecánico. La base constituye el soporte estructural principal, responsable de proporcionar la robustez, estabilidad y rigidez necesarias para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema. Además, se diseñó con materiales y geometrías que soportan el peso total del conjunto, incluyendo el motor, que representa el componente de mayor masa y carga dinámica.

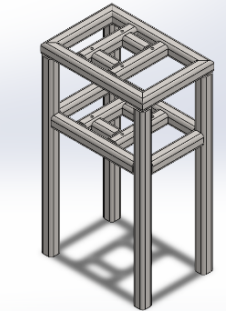
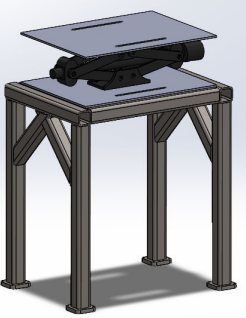
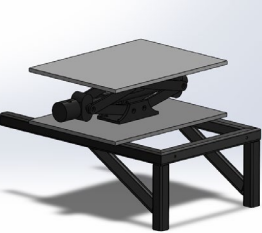


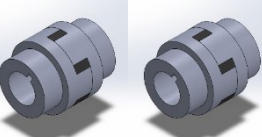
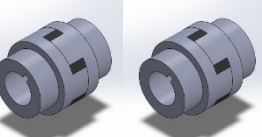
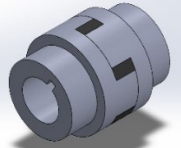
Posteriormente, con el objetivo de realizar un análisis detallado que permitiera seleccionar la alternativa más adecuada conforme a los requerimientos funcionales y estructurales del sistema, se desarrolló el modelado CAD 3D de los diferentes conceptos de acoplamientos y bases para motor. Este procedimiento facilitó la evaluación visual y dimensional de cada configuración, permitiendo identificar las ventajas técnicas de cada una y su grado de compatibilidad con el diseño general del sistema. El modelado se efectuó mediante el programa SolidWorks® 2021 (versión estudiantil), herramienta que permitió validar los parámetros de diseño.

Cada uno de los modelos fue diseñado respetando las medidas reales que se utilizaron en la construcción del sistema, considerando tanto el acoplamiento tipo estrella con la forma

de sujeción seleccionada (combinación de cuña y tornillos). Esto permitió comparar factores como facilidad de ensamblaje, alineación, compatibilidad dimensional y comportamiento estructural, con el objetivo de seleccionar la opción que mejor se acople a las condiciones operativas específicas y garantice el correcto funcionamiento del conjunto mecánico.

En la Tabla 17 se presentan las configuraciones de montaje consideradas para el sistema, entre las cuales se destacan: una base para el motor independiente de la estructura de la máquina y con alturas fijas, una base independiente con altura ajustable y una base acoplable directamente a la estructura de la máquina con altura variable.

**Tabla 17. Tabla comparativa de bases para motor.**

<b>Configuración</b>	<b>Base con Altura Fija (2 máquinas + eje)</b>	<b>Base con Altura Ajustable (con eje)</b>	<b>Base Directa a Máquina (sin eje)</b>
Altura	Fija	Ajustable mediante mecanismo	Ajustable mediante mecanismo
Conexión	Eje intermedio	Eje intermedio	Directa (motor → máquina)
Uso Recomendado	Máquinas con distancias fijas	Entornos con variabilidad de altura	Sistemas integrados compactos
Modelado CAD 3D			
Conexión para acoplamientos			
Cantidad de acoplamientos			

Una vez seleccionados los diferentes conceptos para la base del motor, se procedió a evaluar las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones, con el propósito de identificar aquella que mejor se adapte a las necesidades del cliente y los requerimientos técnicos y de operación previamente establecidos. En la Tabla 18 se presentan los conceptos evaluados para cada configuración, para ello se asignó una puntuación del 1 al 5, donde 1 representa el desempeño más bajo y 5 el más alto.

**Tabla 18. Evaluación de conceptos para la base del motor**

<b>Base</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Puntuación</b>
Base independiente con altura fija	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño estructural simple y económico.</li> <li>• Fácil fabricación y montaje.</li> <li>• Asegura una posición estable del motor durante la operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No permite ajustar la altura del motor ante desalineaciones.</li> <li>• Requiere un eje intermedio adicional, lo que incrementa las pérdidas mecánicas y el mantenimiento.</li> <li>• Menor flexibilidad ante cambios en la configuración del sistema.</li> </ul>	3
Base independiente con altura ajustable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite un alineamiento preciso mediante ajuste de altura.</li> <li>• Mejora la eficiencia del acoplamiento al reducir desalineaciones.</li> <li>• Estructura independiente que facilita su uso en diferentes equipos.</li> <li>• Ajuste manual mediante tornillo y manivela de fácil operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere un eje intermedio, aumentando el número de componentes y el mantenimiento.</li> <li>• Mayor complejidad de fabricación y costo.</li> <li>• Posible reducción en la rigidez estructural por el mecanismo de ajuste.</li> </ul>	4
Base acoplada directamente a la máquina con altura ajustable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina la necesidad de un eje intermedio, reduciendo pérdidas mecánicas y aumentando la eficiencia.</li> <li>• Mejora la estabilidad y rigidez al formar parte integral de la máquina.</li> <li>• Permite ajuste de altura preciso mediante gato hidráulico y manivela. Adecuado para condiciones de operaciones exigentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño más complejo y costo de fabricación moderado.</li> <li>• Requiere precisión en el montaje y alineamiento con la estructura principal.</li> <li>• Puede incrementar el peso total del conjunto.</li> </ul>	5

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilita el desmontaje y utilización en otras máquinas.</li> </ul>		
--	---	--	--

Como resultado del análisis comparativo realizado, se determinó que la mejor opción es la configuración que emplea una base sujeta directamente a la máquina, equipada con un mecanismo de elevación. Esta alternativa destaca por incorporar un menor número de componentes, lo cual se traduce en un ahorro significativo tanto en costos como en mantenimiento, su diseño modular permite utilizar la misma base en múltiples máquinas, no limitándose únicamente a dos equipos, lo cual incrementa su versatilidad y funcionalidad, también es importante mencionar que mejora la alineación entre ejes y optimiza el aprovechamiento de la potencia del motor.

### 3.3 Fase 2. Diseño en el nivel sistema

En esta fase se abordó el proceso de diseño en el nivel sistema, que implicó desarrollar la arquitectura del producto, en donde se realizó la asignación de los elementos funcionales de un producto a los elementos de construcción físicos del producto, en términos de lo que hacen y de su relación o interfaz con los demás elementos del sistema.

El resultado final del establecimiento de la arquitectura del producto, fue una disposición geométrica aproximada del producto, descripciones de los trozos principales y documentación de cómo interactúan los trozos.

Este proceso inició por crear un esquema del producto, que representa la idea que tiene el equipo de diseño de los elementos constitutivos del producto, en esta etapa el esquema resultante no es único y se podrán hacer varias alternativas y emplear un método de selección adecuado.

Después de esto se agruparon los elementos del esquema, mediante la asignación de los elementos del esquema a un trozo. En seguida se creó una disposición geométrica en dos o tres dimensiones, usando dibujos, modelos de computadora o modelos físicos, con el fin de considerar si las interfaces geométricas entre los trozos son factibles y resolver las relaciones dimensionales básicas entre los trozos. Por último, se identificaron interacciones fundamentales e incidentales, que se trata de una red de interacciones entre subsistemas, módulos y componentes [1].

### 3.3.1 Crear un esquema del producto

Un esquema es un diagrama que representa la visión de un equipo de trabajo sobre los componentes constitutivos del producto [1]. A continuación, en la Figura 46 se presenta un esquema de la transmisión que se empleó para controlar dos máquinas agrícolas, en el que se pueden observar elementos físicos y funcionales, de todo el sistema que conlleva implementar una transmisión común.

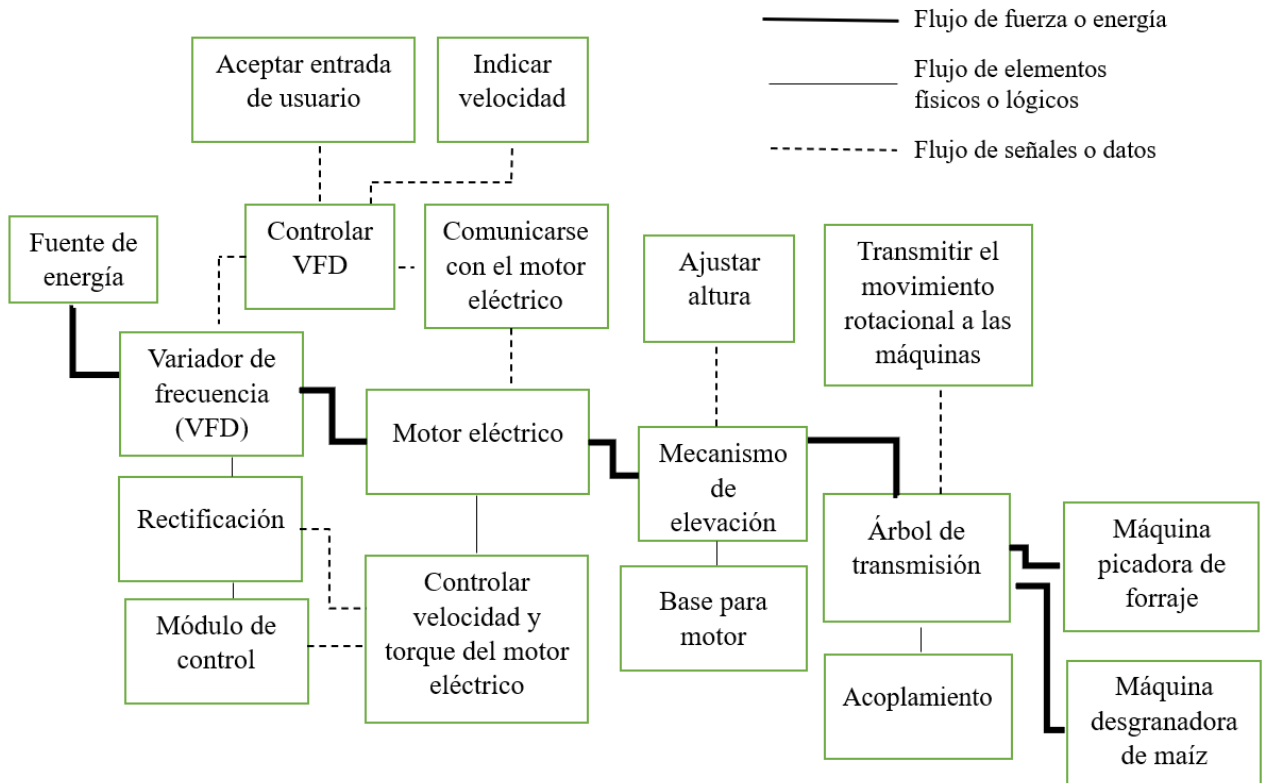


Figura 46. Esquema del mecanismo de transmisión adaptable a dos máquinas agrícolas.

### 3.3.2 Agrupar los elementos del esquema

Posteriormente se asignó cada uno de los elementos del esquema a un trozo (Figura 47), considerando diversos factores que determinan cuándo es conveniente integrar componentes dentro de un mismo conjunto. Entre los criterios más relevantes destacan la integración geométrica y precisión, la funcionalidad compartida, la similitud en la tecnología de diseño o producción, la posibilidad de estandarización y la facilidad para realizar modificaciones o aislar cambios. Estos aspectos permiten lograr una estructura modular eficiente, que favorece la optimización del diseño, la reducción de costos y la flexibilidad funcional del sistema.

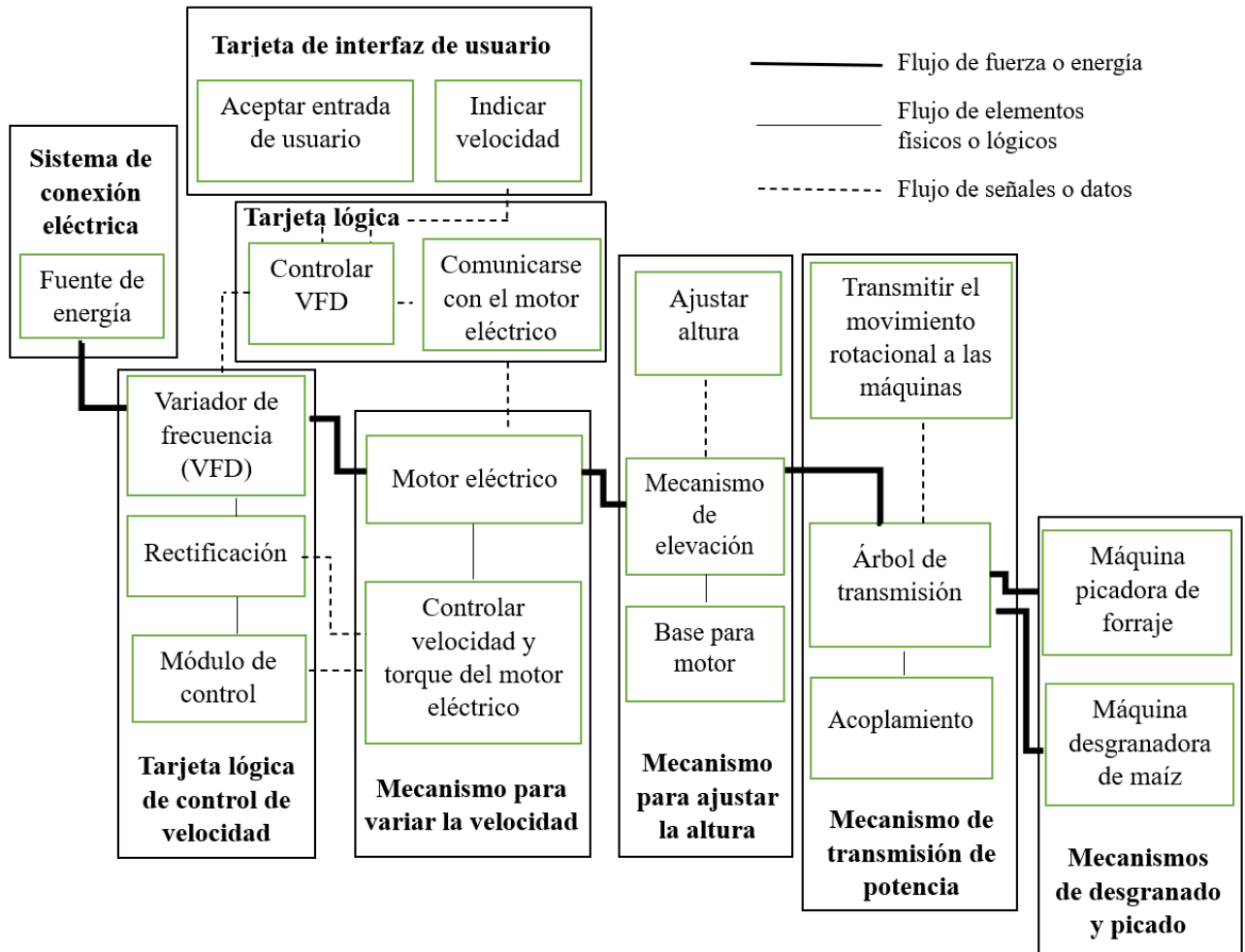


Figura 47. Agrupación de elementos en trozos.

Para comprender de una mejor manera el funcionamiento que tiene cada uno de los elementos utilizados para que la transmisión de potencia funcione, a continuación, se da una descripción del funcionamiento de cada componente:

- Sistema de conexión eléctrica: Proporciona la energía necesaria para todos los componentes eléctricos, asegurando un suministro constante y confiable para el sistema de transmisión.
- Tarjeta de interfaz de usuario: Permite al operador controlar y monitorear la velocidad y el estado de la transmisión. Incluye botones y/o una pantalla para ajustar la configuración de salida de velocidad.
- Variador de frecuencia: Ajusta la velocidad del motor eléctrico modificando la frecuencia de la corriente de entrada. Esto permite variar la velocidad de salida de la transmisión de acuerdo con la necesidad.

- Tarjeta lógica: Procesa las señales de control y coordina el funcionamiento de los componentes, como el variador de frecuencia y el motor, según los ajustes de velocidad y carga configurados.
- Motor eléctrico: Convierte la energía eléctrica en energía mecánica, proporcionando la potencia necesaria para mover el árbol de transmisión y, en última instancia, las máquinas agrícolas [2].
- Base para motor: Es la encargada de brindar un ajuste con diferentes tipos de máquinas, de tal manera que el eje del rotor esté alineado con el árbol de las máquinas, para que estos puedan ser conectados y transmitir potencia.
- Árbol de transmisión: Transfiere la potencia del motor eléctrico a las máquinas agrícolas (como la picadora de forraje), manteniendo un acoplamiento eficiente incluso si hay variaciones en el ángulo de trabajo [3].
- Máquina picadora de forraje: Utiliza la potencia transmitida para procesar el forraje, adaptándose a la velocidad de transmisión ajustada para lograr un rendimiento óptimo según el tipo de material y la carga de trabajo [4].
- Máquina desgranadora de maíz: Se encarga de separar los granos de maíz de la mazorca utilizando la energía transmitida por el eje [4].

### **3.3.3 Crear una disposición geométrica aproximada**

El siguiente paso del establecimiento de la arquitectura del producto implica crear una disposición geométrica aproximada del producto, esto se puede hacer mediante dibujos, modelos de computadora o modelos físicos. La creación de esta disposición geométrica permite considerar si las interfaces entre las diferentes partes son factibles y resolver las relaciones dimensionales básicas [9].

Una vez identificados los componentes principales del esquema del producto, se procedió a realizar una disposición geométrica en dos dimensiones con la posición de los trozos principales (Figura 48).

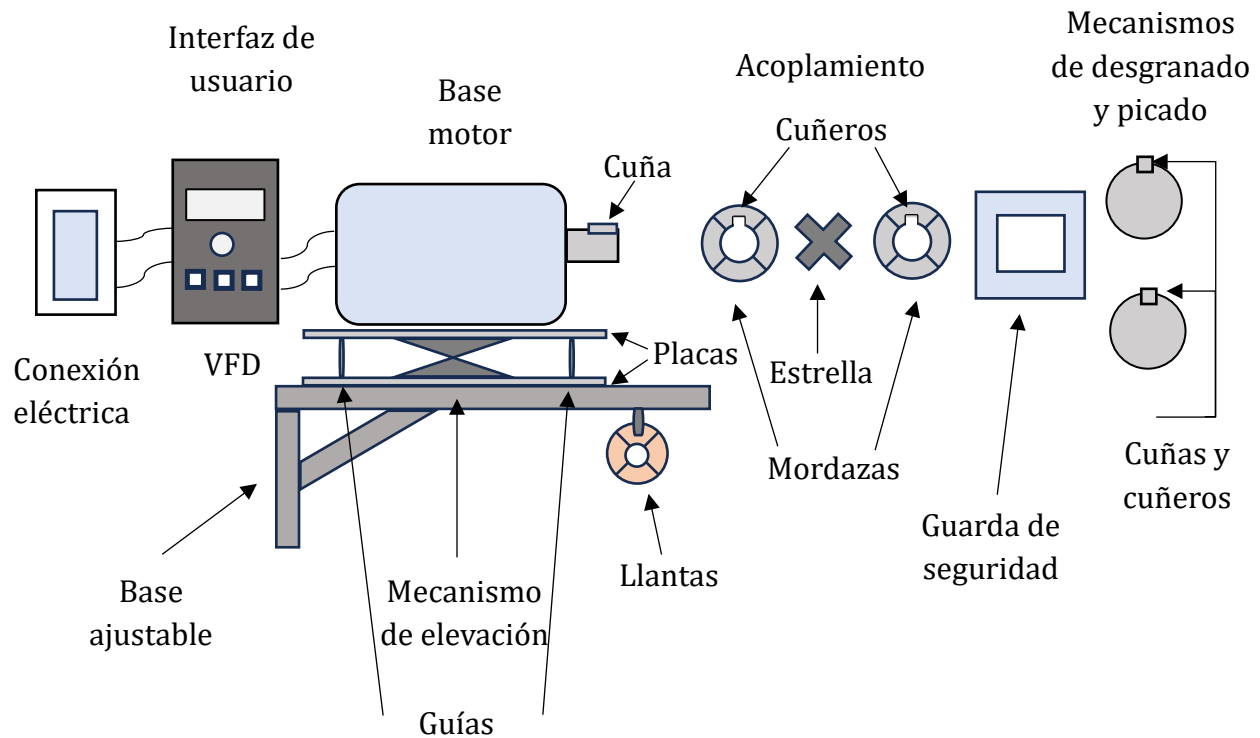
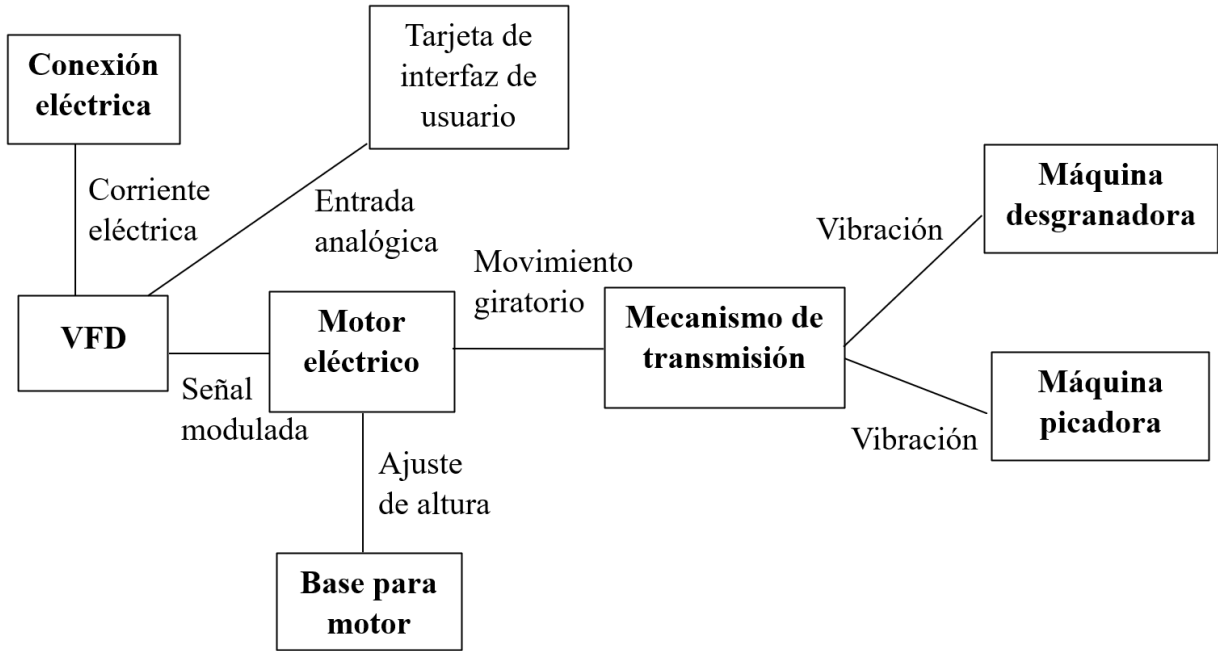


Figura 48. Disposición geométrica en 2D del esquema del producto.

### 3.3.4 Identificar las interacciones fundamentales e incidentales

El paso 4 de la Fase 2 implica identificar las interacciones fundamentales e incidentales entre las diferentes partes o trozos del producto. Las interacciones fundamentales son aquellas que corresponden a las conexiones planificadas entre los trozos. Por otro lado, las interacciones incidentales son las que surgen debido a la activación física de los elementos funcionales o a la disposición geométrica de los trozos [9].

Para este paso se identificaron las interacciones conocidas entre trozos, clasificando en dos categorías las interacciones entre trozos, por un lado, están las interacciones fundamentales, que corresponden a las líneas del esquema que conectan los trozos unos con otros. Y en segundo lugar se tienen las interacciones incidentales, que resultan debido a la actividad física particular de los elementos funcionales (Figura 49).



*Figura 49. Diagrama de interacción incidental.*

### 3.4 Fase 3. Diseño de detalle

La fase de diseño de detalle representa un paso crítico en el desarrollo de productos, ya que en esta etapa se definen con precisión todos los aspectos técnicos y operativos necesarios para la fabricación y ensamblaje. Esto incluye la determinación de la geometría exacta, los materiales a emplear, las tolerancias requeridas y las especificaciones de las piezas estándar adquiridas de proveedores externos. Además, se desarrolla un plan de proceso que describe las etapas de manufactura y se diseña el herramental específico para cada componente fabricado internamente. Como resultado, esta fase generó la documentación de control del producto, compuesta por dibujos técnicos que detallan cada pieza, las especificaciones de las piezas compradas y los planes de proceso [9].

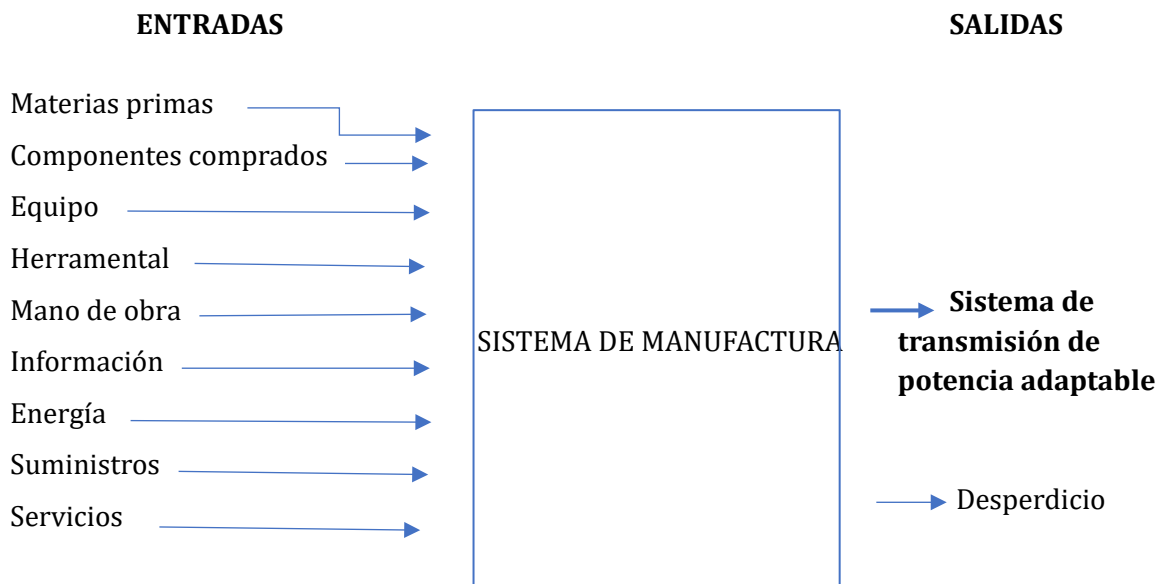
El diseño industrial, se encarga de atender los aspectos de un producto que se relacionan con el usuario, como la estética y ergonomía de este. Este proceso incluye una serie de pasos, iniciando por investigar las necesidades del cliente en colaboración con mercadotecnia, conceptualizar bocetos y formas del producto, desarrollar modelos suaves preliminares, crear modelos duros con detalles finales, y elaborar dibujos o modelos de control que documentan las características del producto. Finalmente, se coordina con otras funciones durante diferentes etapas del desarrollo, según la interacción del producto con el usuario y su dependencia tecnológica [9].

### 3.4.1 Diseño para manufactura

El diseño para manufactura (DPM) es una práctica integradora esencial en el desarrollo de productos, que requiere un equipo interfuncional para aprovechar diversas fuentes de información como bosquejos, especificaciones de producto, procesos de producción y estimaciones de costos.

El proceso iterativo de DPM consta de cinco pasos, de acuerdo con Ulrich y Eppinger: estimar los costos de manufactura, reducir costos de componentes y ensamble, disminuir costos de soporte de producción, y considerar el efecto de decisiones del DPM en otros factores. Este método permite iteraciones constantes para mejorar el diseño hasta alcanzar un producto optimizado y listo para producción.

Inicialmente se deben estimar los costos de manufactura, el cual comprende la suma de todos los gastos para las entradas del sistema más el costo por disponer de los desperdicios producidos por el sistema (Figura 50) [9].



*Figura 50. Modelo entrada y salida de un sistema de manufactura.*

### Selección de materiales

A continuación, se realizó la selección de materiales para la base ajustable destinada a un motor eléctrico. El sistema mecánico debe cumplir con criterios de resistencia, durabilidad, portabilidad y bajo costo, por lo que la elección adecuada de materiales es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento y eficiencia del sistema. Para los costos se consultó un precio aproximado en diferentes páginas web que venden los materiales a utilizar [17], [15], [20], [7].

Para realizar la selección de materiales (Tabla 19), se consideraron los siguientes criterios técnicos y de aplicación:

- Propiedades mecánicas
- Disponibilidad local
- Facilidad de manufactura
- Peso y costo del material
- Comportamiento en ambientes con polvo o humedad

**Tabla 19. Tabla comparativa de materiales candidatos.**

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Propiedades Clave</b>	<b>Facilidad de Soldadura</b>	<b>Costo</b>	<b>Comentarios</b>
Acero A36	Acero al carbono	Buena resistencia, fácil soldadura	Alta	Bajo	Ideal para estructuras generales
Acero galvanizado	Acero al carbono con zinc	Resistente a la corrosión	Media	Medio	Requiere cuidados al soldar
Acero inoxidable 304	Inoxidable	Alta resistencia y durabilidad	Media	Alto	Exceso de costo para este proyecto

El acero A36 fue seleccionado por sus ventajas comparativas en términos de costo, facilidad de trabajo y resistencia estructural. Es un acero al carbono de uso estructural ampliamente disponible en el mercado. Se puede soldar con electrodos tipo E6013, comunes en talleres metálicos. Además, permite procesos de corte con discos abrasivos y taladrado convencional.

En la selección de componentes del sistema de control, se consideró un motor de 3 hp con regulación de velocidad mediante un variador de frecuencia (VDF), se optó por un motor trifásico, debido a que los motores trifásicos presentan una integración más directa con VDF y un desempeño más estable en un rango amplio de velocidades, al generar un campo magnético giratorio y un par más uniforme, en contraste, el control de velocidad en motores monofásicos suele requerir consideraciones adicionales y puede presentar mayores limitaciones operativas, especialmente a bajas velocidades [42]. El VDF se seleccionó en función de la capacidad del motor, priorizando la compatibilidad por corriente nominal y margen operativo, por ello se eligió un equipo de 4 kW, suficiente para

accionar el motor de 3 hp. Para la instalación eléctrica se consideró el uso de conductor calibre 12 AWG para la conexión entre el VDF y el motor, sujeto a la verificación de la corriente de placa, el método de instalación y la normativa aplicable.

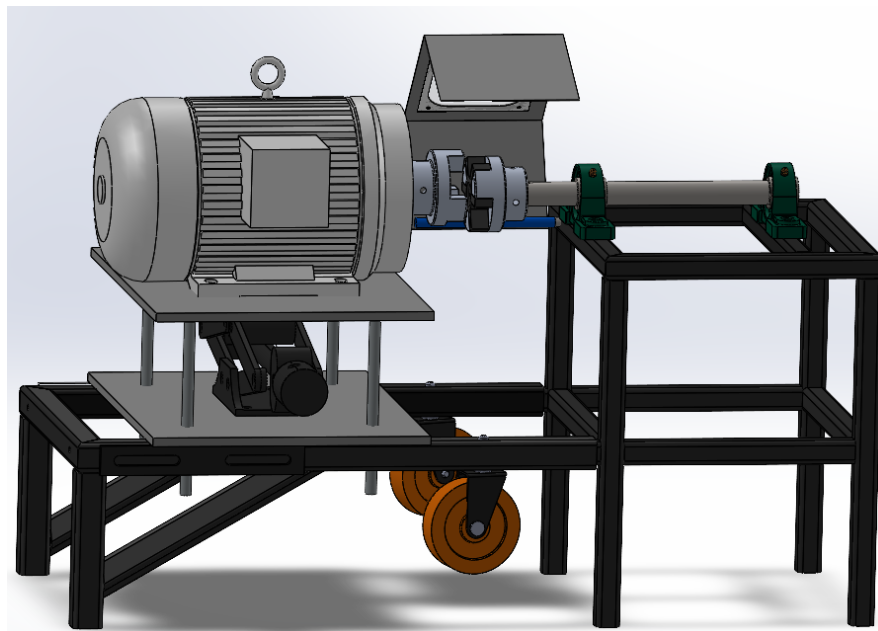
En la Tabla 20 se muestra el listado de materiales seleccionados para la construcción de la base del motor, el mecanismo de elevación y la guarda de seguridad, asimismo se incluyen los componentes y materiales seleccionados para la fabricación de una base auxiliar, diseñada para simular la estructura de una máquina agrícola, esta base cuenta con un eje de transmisión que permite acoplarse directamente al eje del rotor mediante el acoplamiento seleccionado, posibilitando así la transferencia del movimiento rotacional como se muestra en la Figura 51, por su parte, la Tabla 21 contiene el listado de componentes que conforman el sistema de control.

**Tabla 20. Lista de componentes para la base del motor y acople**

No.	Componente	Cantidad	Material	Dimensiones	Costo Total (MXN)
1	Estructura base	1	Perfil tubular cuadrado calibre 18	1"	\$224.00
2	Cubierta refuerzos	1	Lámina negra 0.72 mm	40 cm × 15 cm	\$60.00
3	Llantas	2	Goma maciza y metal	10 cm × 10 cm	\$124
	Conjunto tornillo - arandela plana - tuerca	2	Acero galvanizado	1/4" × 2"	\$36.20
4	Tapones	2	PVC	1" × 1"	\$16.00
5	Conjunto tornillo - arandela plana - tuerca	4	Acero galvanizado Tuerca mariposa	3/8" × 2 1/4"	\$44.04
6	Base y plataforma del motor	2	Placa de acero 3/16"	40 cm × 30 cm	\$400.00
7	Guías verticales	4	Vástagos de acero cromado 7/16"	25 cm	\$200

<b>8</b>	Guías laterales	1	Solera 1/4 "	50 cm	\$90.00
<b>9</b>	Bujes	4	Redondo: Acero	1"	\$40.00
<b>10</b>	Gato mecánico	1	Acero forjado	Altura máxima: 40 cm	\$200.00
<b>11</b>	Conjunto tornillo - arandela plana - arandela de presión - tuerca	4	Acero al carbono de alta resistencia  Tuerca con inserto de nylon	7/16" × 2"	\$50.96
<b>12</b>	Conjunto tornillo - arandela plana - arandela de presión - tuerca	4	Acero al carbono de alta resistencia  Tuerca con inserto de nylon	3/8" × 2"	\$26.32
<b>13</b>	Acoplamiento estrella	1	Poliuretano	Estándar (según proveedor)	\$480.00
<b>14</b>	Mordazas	2	Acero	Diámetro interior: 1" y 1 1/8"	
<b>15</b>	Opresores Allen sin cabeza	4	Acero aleado	1/4" × 3/4"	\$15.72
<b>16</b>	Estructura guarda	1	Lámina negra 0.72 mm	40 cm × 15 cm	\$60.00
<b>17</b>	Ventana guarda	1	Acrílico	10 cm × 10 cm	\$40.00
<b>18</b>	Tornillos Allen cabeza socket	4	Acero al carbono	1/8" × 1/4"	\$9.84
<b>19</b>	Eje de sujeción	1	Redondo acero 3/8"	18 cm	\$30.00
<b>20</b>	Cubierta eje	1	Tubo redondo acero 7/16"	15 cm	\$20.00

21	Estructura	1	Perfil tubular cuadrado calibre 18	1 1/4"	\$262.00
22	Chumaceras	2	Hierro fundido	1"	\$165.79
23	Eje	1	Redondo acero 1"	35 cm	\$100
24	Cuña	1	Cuña cuadrada 1/4"	6 cm	\$20.00
25	Cubierta estructura	1	Lámina negra 0.72 mm	135 cm × 35 cm	\$150
26	Tapones	4	Plástico	1 1/4" × 1 1/4"	\$28.00
27	Conjunto tornillo - arandela plana - arandela de presión - tuerca	4	Acero al carbono de alta resistencia Tuerca con inserto de nylon	3/8" × 2 1/2"	\$124.14



*Figura 51. Modelo CAD 3D de la disposición geométrica.*

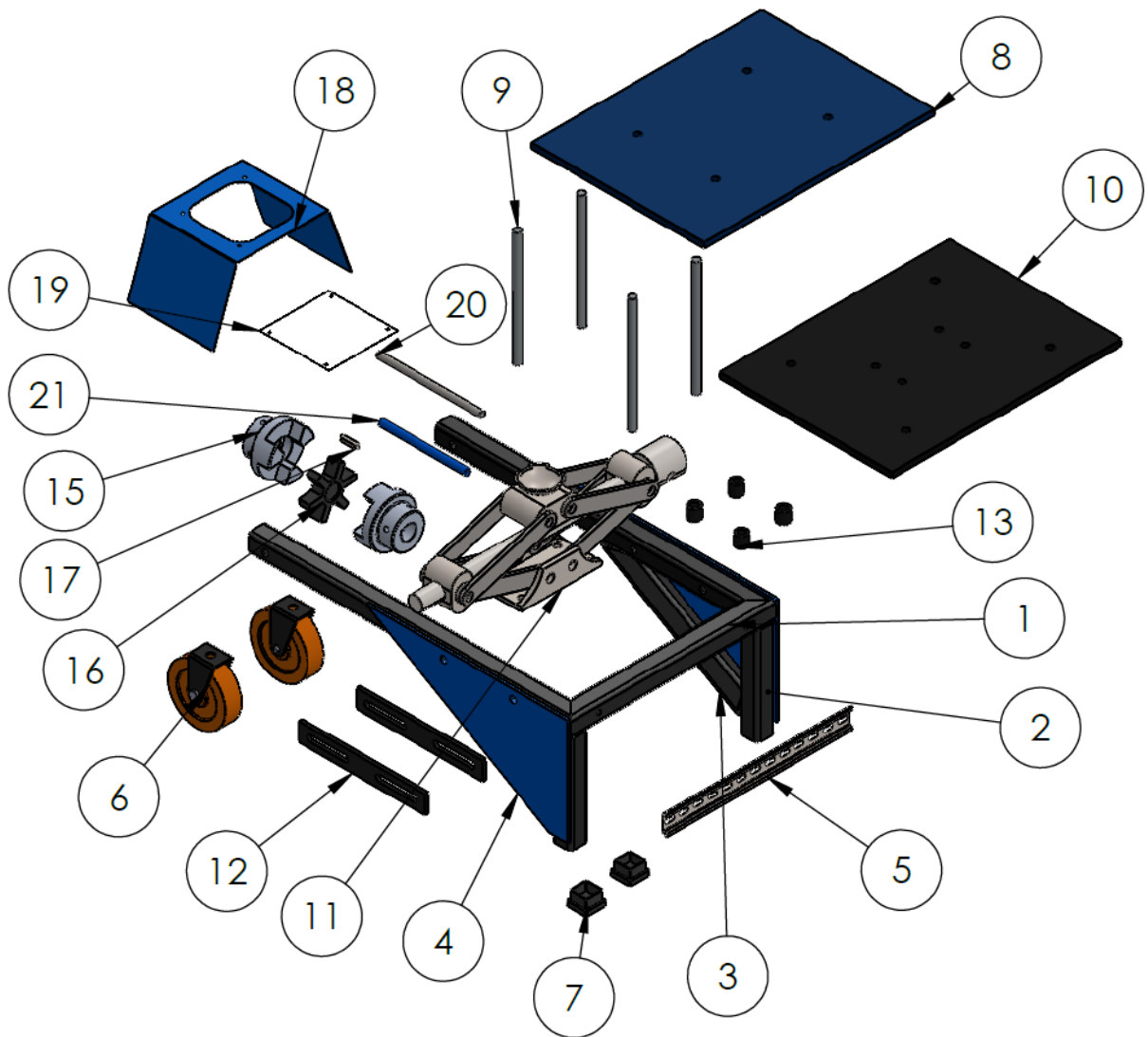
**Tabla 21. Lista de componentes para el sistema de control**

No.	Componente	Requerido	Especificaciones	Precio
1	Motor	1	Motor trifásico de 3 hp	-
2	VDF	1	Convertidor de frecuencia de salida trifásica de 4 kW, entrada trifásica de 220V y salida trifásica de 220V/380V	\$1,295.84
3	Cable	6 m	Conductor calibre 12 AWG	\$78.00
4	Riel	32 cm	Riel Din	\$50.00

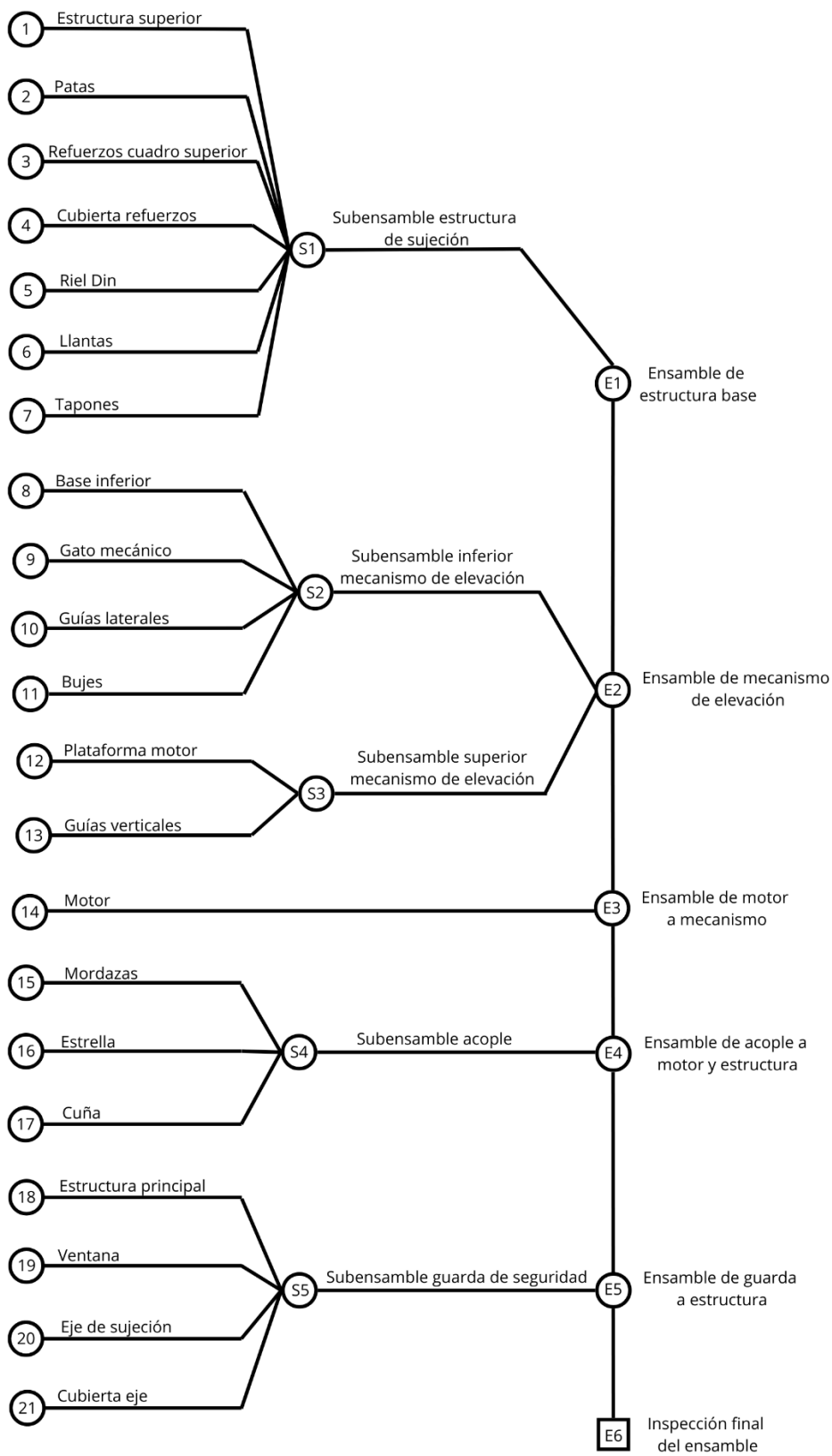
El costo total estimado del sistema de transmisión fue de aproximadamente \$3,590 MXN, excluyendo los gastos asociados a la fabricación de la base auxiliar.

### 3.4.2 Diagrama de flujo del proceso de ensamble

La gráfica de ensamble es una herramienta visual que se utiliza para mostrar la secuencia de ensamblaje de un producto. Esta gráfica se elabora a partir del dibujo de ensamble y muestra paso a paso cómo las piezas individuales se van colocando para formar subensambles y finalmente el ensamble total del producto, la gráfica proporciona una visión general de cómo se montarán las partes manufacturadas individualmente para llegar a conformar el producto final, esto ayuda a comprender mejor el proceso de ensamblaje y facilita la planificación y optimización de la producción [43]. En la Figura 52 se observa el explosionado del sistema de transmisión con el número de cada elemento, de acuerdo con el diagrama de la Figura 53 en donde se muestra el proceso de ensamble de todas las piezas y elementos que conforman la transmisión común para maquinaria agrícola, el cual consta de veintidós partes, que a su vez forman parte de cinco subensambles y estos son parte de seis ensambles principales.



*Figura 52. Explosión del sistema de transmisión*



**Figura 53. Diagrama de ensamble de componentes para la transmisión común.**

### **3.4.3 Diagrama de operaciones del proceso**

Cuando la gráfica de ensamble se complementa con instrucciones detalladas para la producción del artículo, incluyendo especificaciones de las partes componentes, se denomina gráfica de operaciones del proceso [43].

Esta gráfica representa los materiales que ingresan al proceso, las operaciones realizadas y el orden de ensamble. Es importante señalar que los materiales sometidos a operaciones se ubican en la parte superior de la gráfica, representados por líneas horizontales, mientras que las piezas adquiridas se incorporan en el punto específico de uso, también indicadas con líneas horizontales. Por otro lado, el flujo del proceso (operaciones) para estos materiales se sigue de forma vertical [43]. En la Figura 54, se muestra el diagrama de operaciones realizado para el proceso de manufactura, para una vista más detallada de éste véase el Apéndice B.

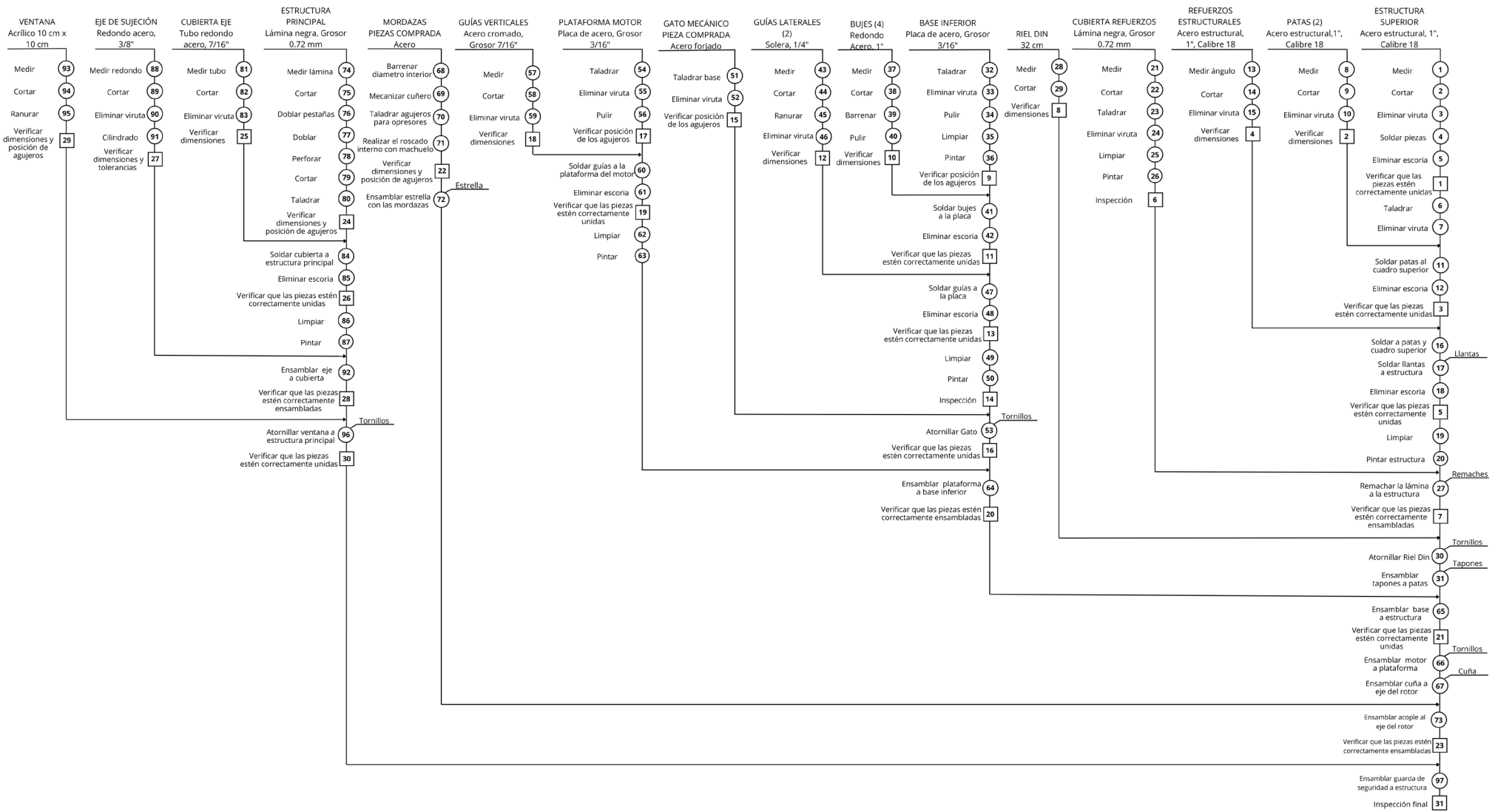


Figura 54. Diagrama de operaciones del proceso para fabricación.

## **Análisis de frecuencia**

Con la finalidad de garantizar la integridad estructural y el desempeño dinámico del mecanismo elevador diseñado para soportar y posicionar un motor trifásico de 34 kg, se realizó un análisis utilizando el módulo de simulación de SolidWorks® 2021 (versión estudiantil). El estudio se centró en los elementos principales del sistema, dentro de los cuales se encuentra la estructura de la base, las plataformas superior e inferior y las guías lineales para el desplazamiento vertical. En este caso el gato mecánico tipo tijera empleado fue un componente adquirido y cuenta con una capacidad certificada para soportar hasta 2 t, por tratarse de un elemento ya diseñado y validado para dicha carga, se determinó que no era necesario incluirlo dentro del análisis.

El análisis modal permite identificar las frecuencias naturales de vibración del sistema y las correspondientes formas modales, lo cual es esencial para evitar la resonancia estructural durante la operación. Dado que el mecanismo será sometido a vibraciones inducidas por el motor trifásico, cuyo rango operativo corresponde aproximadamente a 8-50 Hz, es indispensable conocer la respuesta dinámica de la estructura.

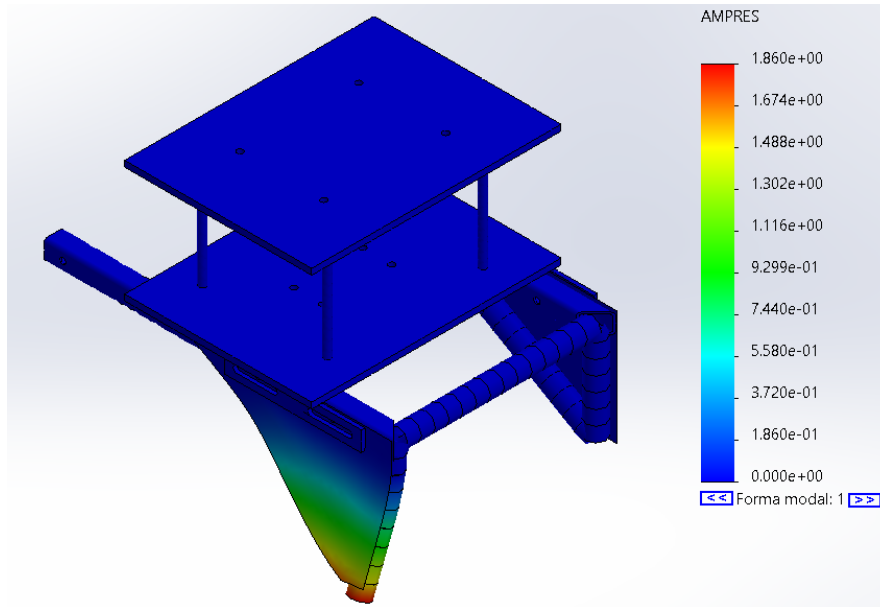
Para el análisis se definieron las siguientes condiciones:

- Sujeciones fijas en los extremos de los perfiles tubulares horizontales y las 4 caras interiores respectivamente, para representar su ensamble rígido con la máquina base.
- Carga remota de 34 kg aplicada sobre la placa superior para simular el peso del motor.
- Materiales asignados según el diseño real.
- Inclusión de la gravedad.

El programa SolidWorks® entrega los modos de vibración, que representan los patrones en que el conjunto puede deformarse naturalmente bajo vibraciones. A cada forma modal le corresponde una frecuencia específica. Tomando en cuenta que el motor operará a 2912 rpm y 494 rpm en el sistema de transmisión, se tienen los siguientes resultados:

Modo 1: 1207 Hz

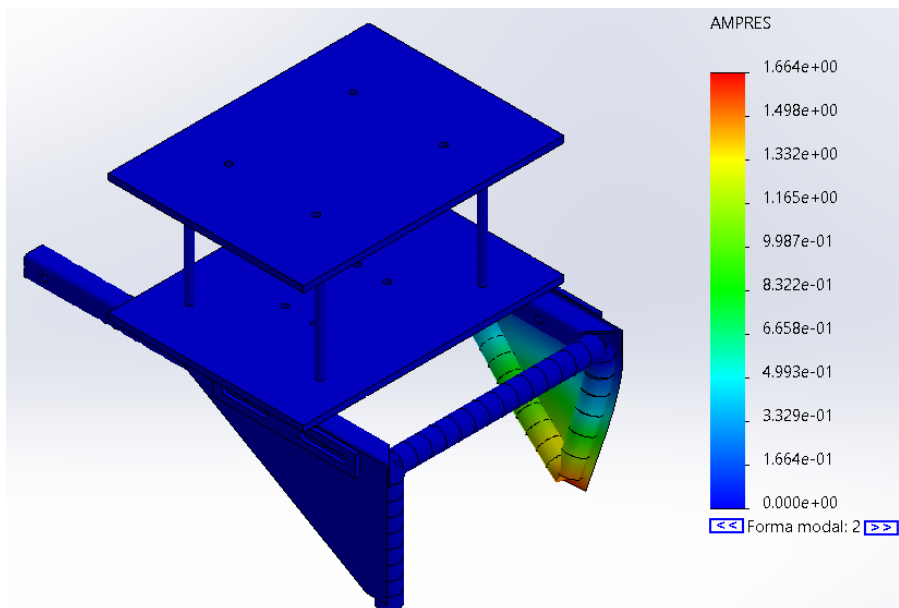
El primer modo modal corresponde a la forma en que el sistema tendería a moverse si fuera excitado levemente. En esta condición, se observa una deformación predominante en la placa inclinada y en el refuerzo lateral que conecta la estructura inferior. La plataforma superior y las guías verticales mantienen su rigidez relativa, mostrando desplazamientos mínimos en comparación con los elementos secundarios, como se muestra en la Figura 55.



**Figura 55. Resultados de deformación, modo 1.**

Modo 2: 1325 Hz

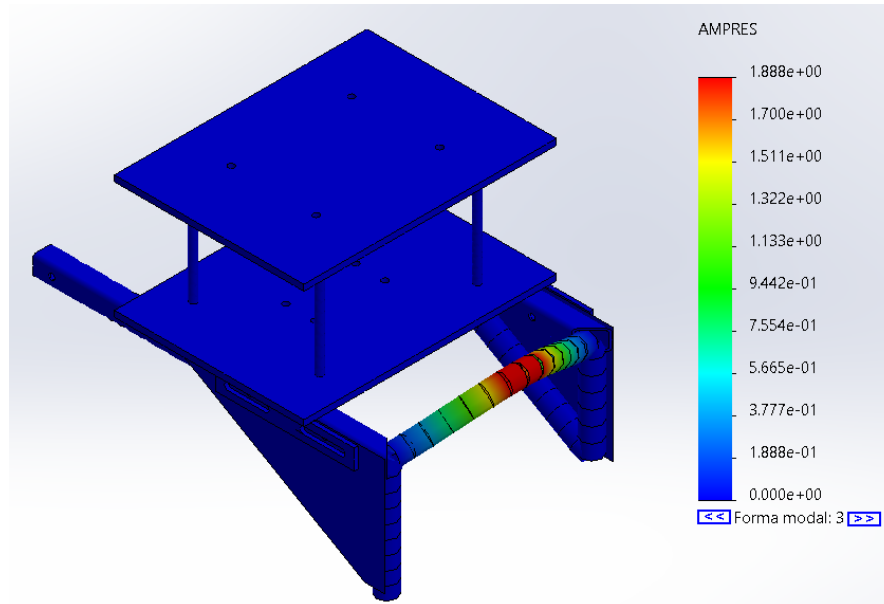
En el segundo modo modal se presenta una vibración con una distribución ligeramente asimétrica. El análisis muestra un incremento en la flexión del lado derecho del conjunto, parecida a la deformación observada en el modo 1, aunque con mayor contribución lateral de la estructura tubular, como se observa en la Figura 56.



**Figura 56. Resultados de deformación, modo 2.**

### Modo 3: 2153 Hz

El tercer modo implica una vibración localizada principalmente en el tubo lateral recto y en el marco inferior que conforma la base del mecanismo. La zona superior donde se soporta el motor muestra una rigidez prácticamente total, con deformaciones despreciables (Figura 57).



*Figura 57. Resultados de deformación, modo 3.*

A 2912 RPM el motor puede inducir vibraciones estructurales en un rango cercano a 48.5 Hz, dado que la separación entre la frecuencia inducida y los modos naturales es amplia, el sistema no entra en resonancia directa. Por lo tanto, a esta velocidad de operación no se esperan afectaciones significativas en el comportamiento estructural.

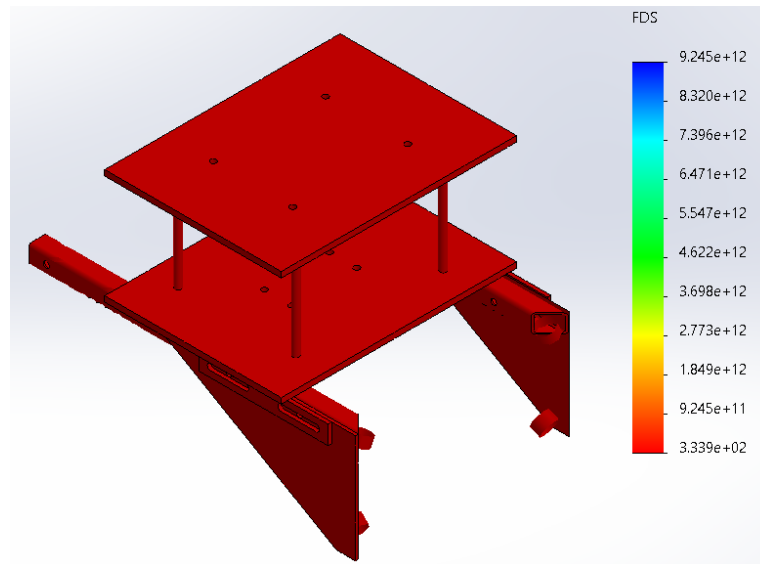
A 494 RPM se tiene una frecuencia de excitación aproximada de 8.23 Hz, valor que resulta considerablemente menor que las frecuencias naturales del sistema, esta diferencia garantiza que no se produzca resonancia durante el funcionamiento. Por tanto, operar el sistema a 494 RPM es estructuralmente seguro, pues las deformaciones previstas son mínimas y la integridad estructural no se ve comprometida.

### **Análisis estático**

Además del análisis dinámico, se evaluó la capacidad de resistencia estructural mediante un análisis estático lineal como se muestra en la Figura 58. Este estudio permitió determinar los esfuerzos y deformaciones bajo cargas gravitacionales y cargas externas

permanentes. Para el análisis se definieron las mismas condiciones que en el análisis de frecuencia.

El estudio arrojó un factor de seguridad mínimo  $\approx 3.3 \times 10^2$ , valor elevado que demuestra que las tensiones generadas son muy inferiores al límite elástico de los materiales utilizados. Esto indica que la estructura trabajará cómodamente dentro del rango elástico, así mismo no existe riesgo de falla estática bajo carga de operación, por tanto, el diseño presenta redundancia estructural considerable, lo cual incrementa la durabilidad y confiabilidad del sistema.



*Figura 58. Distribución de factor de seguridad*

Los análisis dinámico y estático realizados permitieron concluir que el sistema presentó un desempeño estructural robusto y altamente confiable. Las frecuencias naturales obtenidas se encuentran muy por encima de las excitaciones generadas por el motor trifásico en sus dos condiciones de operación, eliminando cualquier posibilidad de resonancia y garantizando estabilidad vibratoria durante el funcionamiento. Las deformaciones modales se concentran únicamente en elementos secundarios, sin afectar la capacidad operativa del sistema, mientras que el análisis estático confirma la existencia de una sobre resistencia significativa, evidenciada por un factor de seguridad elevado. Asimismo, la selección de materiales proporciona un equilibrio adecuado entre rigidez, resistencia y viabilidad de manufactura, permitiendo su fabricación mediante procesos convencionales como corte, doblado, soldadura y mecanizado ligero. En conjunto, estos resultados validan que el diseño final del mecanismo elevador cumple satisfactoriamente con los criterios de funcionalidad, integridad estructural y manufacturabilidad,

constituyéndose como una solución eficiente y segura para el soporte y manejo del motor eléctrico.

Los planos correspondientes a los componentes que se fabricaron se encuentran disponibles en el Apéndice C. Estos planos incluyen las dimensiones y especificaciones técnicas necesarias para su correcta elaboración. Por otro lado, las piezas que fueron adquiridas comercialmente se representan únicamente mediante vistas isométricas y despieces explosionados, con el fin de mostrar la composición, ensamble y disposición de sus componentes, sin detallar sus medidas internas, ya que estas fueron proporcionadas por el fabricante al momento de la compra.

### **3.5 Fase 4. Pruebas y refinamiento**

En esta fase se presentan de manera detallada los pasos de manufactura del prototipo, desde la obtención y preparación de sus componentes hasta su ensamble final, así mismo se establecieron los valores y condiciones bajo los cuáles se llevaron a cabo las pruebas funcionales y de desempeño, con el fin de validar su comportamiento, identificar áreas de mejora e introducir los ajuste necesarios para que cumpla con las funciones para las que fue diseñado y satisfaga los requerimientos de los clientes.

En este contexto, la verificación del cumplimiento de los requerimientos se realizó mediante pruebas llevadas a cabo con el sistema de transmisión desarrollado, en las que se midió la velocidad en los ejes de entrada y salida para evaluar el rendimiento de la transmisión. Asimismo, se realizaron pruebas de compatibilidad, para asegurar que el sistema se integre y funcione correctamente con los demás componentes del sistema.

#### **3.5.1 Manufactura del prototipo**

Una vez aceptada la geometría y el diseño del prototipo con base en los resultados del análisis realizado en SolidWorks® y en las delimitaciones establecidas durante las fases previas del desarrollo, se procedió a la manufactura del mismo en el Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura y Taller de Metales de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, utilizando las máquinas disponibles. La fabricación del sistema se llevó a cabo siguiendo el diagrama de operaciones y el diagrama de ensamble previamente definidos, respetando cada proceso y las condiciones especificadas para cada etapa, de esta manera, se aseguró que la construcción del prototipo fuera consistente con el diseño conceptual y detallado.

En primer lugar, para realizar la estructura superior, se midió el perfil tubular y se realizaron cortes a 45° y 90° según lo requerido, mediante una cortadora de disco abrasivo, posteriormente se eliminó la rebaba de los extremos con una esmeriladora angular y disco de lija de 4", sujetando cada pieza con una prensa de banco (Figura 59).



*Figura 59. Proceso de corte y acabado*

Posteriormente, se realizaron las operaciones de taladrado en un taladro de banco, conforme a las posiciones indicadas en el plano. La unión de los perfiles para las patas y los refuerzos estructurales, se efectuó mediante soldadura por arco eléctrico con electrodos E6013 de 3/32" y una corriente de 80 A, inicialmente se aplicaron punteos para fijar las piezas y asegurar el escuadre a 90°, tras verificar la geometría con una escuadra fija y una escuadra combinada, se completó la unión con cordones continuos. Finalmente, se restiró la escoria y se uniformó la superficie de las uniones, mediante una esmeriladora angular con disco de lija de 4" (Figura 60).



*Figura 60. Proceso de taladrado, soldado y acabado.*

Posteriormente, para la cubierta de los refuerzos, se midió y cortó la lámina destinada a la cubierta de los refuerzos mediante cizalla guillotina (Figura 61).



**Figura 61. Proceso de cizallado.**

Para la base inferior, se eliminaron la rebaba y la rugosidad generadas por el corte del proveedor en las placas, las cuales se adquirieron con las dimensiones requeridas para el proyecto. Para ello, cada placa se fijó a la mesa de trabajo mediante prensas tipo C y se realizó el desbaste con una esmeriladora angular equipada con disco de 7", hasta obtener una superficie uniforme. Posteriormente, se realizó el taladrado en el taladro de banco, con brocas de 3/8" y 1/2" según los diámetros especificados. Finalmente, se mejoró el acabado superficial mediante un lijado con disco de 4" (Figura 62).



**Figura 62. Proceso de desbaste y taladrado.**

El siguiente paso consistió en el maquinado de los bujes requeridos para el ensamble, para ello se utilizó un redondo de acero rectificadado hasta 1" de diámetro, el material se montó en el torno y se realizó un barrenado axial de 1/2", posteriormente, se seccionó en piezas individuales conforme a las dimensiones de diseño y, finalmente se aplicó un chaflán en los bordes de cada buje (Figura 63).



*Figura 63. Manufactura de bujes.*

Los bujes se soldaron a la placa mediante soldadura por arco eléctrico, utilizando electrodos E6013 de 3/32" y una corriente de 75 A, inicialmente se aplicaron punteos para fijar las piezas y verificar su correcta posición, posteriormente, la unión se completó con cordones continuos, finalmente, se retiró la escoria (Figura 64).



*Figura 64. Bujes soldados a la placa.*

Posteriormente, se realizaron las guías laterales a partir de solera de 1/4", el material se midió y se cortó conforme a los planos utilizando la cortadora de disco abrasivo, a

continuación, se realizó el ranurado en la fresadora vertical, utilizando portaherramientas R8 y una fresa de 7/16", el mecanizado se efectuó de forma progresiva con refrigerante y una remoción aproximada de 2 mm por pasada, con el fin de evitar el sobrecalentamiento y reducir el riesgo de daño térmico y fractura de la herramienta, posteriormente, se eliminó la rebaba en los bordes. Finalmente, las guías se soldaron a la placa mediante punteos para verificar el escuadre a 90° y la posición, después se retiró la escoria (Figura 65).



**Figura 65. Manufactura de guías laterales.**

Posteriormente, las llantas se soldaron a la estructura principal mediante punteos, se retiró la escoria, se realizó la limpieza superficial y se procedió a pintar la estructura, la cubierta de refuerzos y la placa base inferior con los componentes soldados, utilizando una pistola de aire, una vez secos, la lámina se fijó a la estructura metálica mediante remaches de 1/8", empleando una remachadora manual, para ello se realizaron previamente los agujeros con un taladro y broca de 1/8", asegurando la alineación entre la lámina y el perfil tubular. Finalmente, se cortó el riel Din a la longitud requerida y se ensambló mediante un conjunto de tornillo, tuerca y arandela plana de 1/4" x 2" (Figura 66).



**Figura 66. Proceso de pintado y remachado.**

A continuación, se realizó el taladrado de la base del gato mecánico, para esta operación el componente se sujetó en una prensa de banco y se perforó con un taladro y una broca de 3/8", conforme a los puntos de fijación establecidos, después se eliminaron la viruta y las rebabas mediante una lima plana para metal (Figura 67).



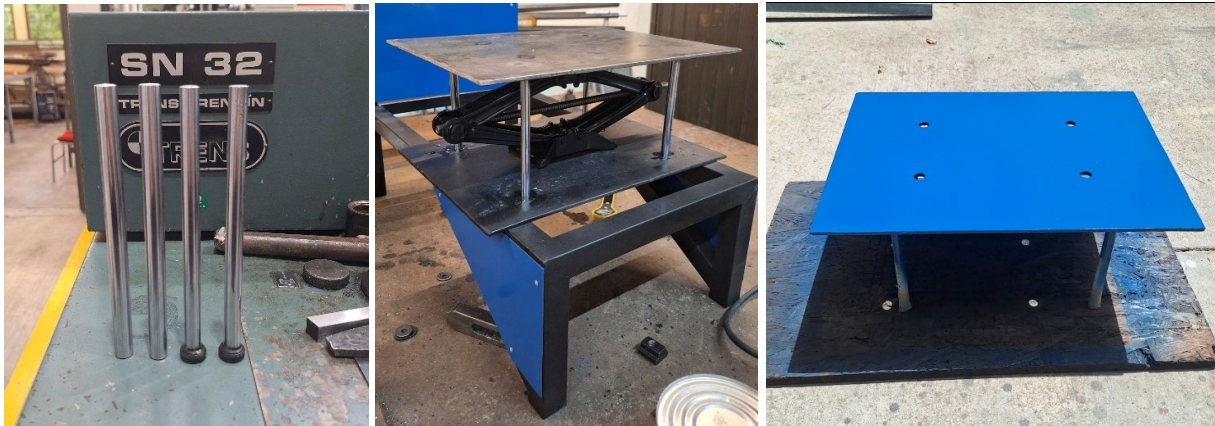
*Figura 67. Taladrado de componente.*

El siguiente paso fue realizar la plataforma del motor, en donde se realizaron las perforaciones en la placa destinada a la sujeción del motor, para ello se llevó a cabo el taladrado de los cuatro puntos de fijación en la fresadora vertical, utilizando un portaherramientas R8 y una broca de 7/16". Previamente, se marcó el centro de cada perforación con un punzón, durante el taladrado se aplicó lubricante de corte, con una penetración aproximada de 3 mm por pasada. Al finalizar, se retiró la viruta y se eliminaron las rebabas con una esmeriladora angular con disco de lija de 4" (Figura 68).



*Figura 68. Perforado de placa.*

A continuación, se definieron las dimensiones de las guías verticales y se cortó el material en el torno convencional con herramienta de tronzado, después del corte se retiró la viruta. Posteriormente, las guías se soldaron a la placa con electrodos E6013 de 3/32" y una corriente de 75 A, inicialmente se aplicaron punteos para fijar cada guía y verificar el escuadre a 90° con una escuadra metálica, una vez confirmada la alineación, se completó la unión con un cordón continuo, finalmente se retiró la escoria, se realizó la limpieza superficial y se procedió a pintar con pistola de aire (Figura 69).



**Figura 69. Fabricación de la plataforma para el motor.**

En una etapa subsiguiente, se acondicionó el acoplamiento destinado a la transmisión de potencia entre el eje del motor y el eje del rotor, para ello, se adquirió un acoplamiento tipo estrella, compuesto por dos mordazas, a las cuales se realizaron adecuaciones dimensionales. Cada mordaza se montó en el torno convencional y se realizó el barrenado del diámetro interior conforme a los requerimientos de montaje: 1" en la primer mordaza y 1 1/8" en la segunda, posteriormente se mecanizó un cuñero cuadrado de 1/4" mediante una operación de mortajado en torno, para la cual se fabricó una herramienta de corte específica (Figura 70).



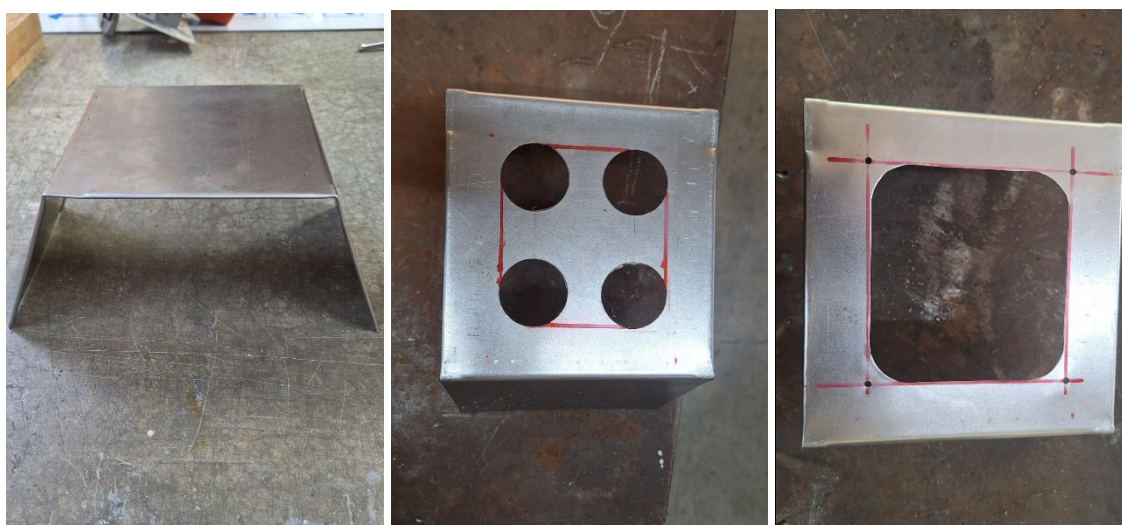
**Figura 70. Acondicionamiento del acoplamiento.**

Una vez mecanizados los cuñeros, se realizaron los orificios para los tornillos prisioneros en la fresadora vertical, utilizando una broca de 1/4", en cada mordaza el primer orificio se ubicó alineado con el cuñero y el segundo a 90° respecto del primero. Posteriormente, se realizó el roscado interno mediante el uso de machuelo y maneral (Figura 71).



*Figura 71. Taladrado y roscado para tornillos prisioneros.*

Finalmente, se fabricó la guarda de seguridad, para la estructura principal, el material se midió conforme a las dimensiones de diseño y se cortó mediante la cizalla, posteriormente, se realizó el doblado de pestañas en la dobladora y, a continuación, el doblado principal para obtener la geometría final. Para la apertura principal, se realizaron perforaciones con un taladro equipado con una broca copa y se retiró el material restante con la esmeriladora angular y disco de corte. Por último, se taladraron los orificios destinados a la sujeción de la ventana (Figura 72).



*Figura 72. Fabricación de guarda de seguridad.*

Como etapa posterior, se midió y cortó un tubo redondo para fabricar la cubierta del eje de sujeción, tras retirar la viruta la cubierta se soldó a la estructura principal mediante punteos con electrodos E6013 de 3/32", posteriormente, se retiró la escoria. De manera subsecuente, se cortó el eje de sujeción, sobre el cual se ensambla la guarda de seguridad y se realizó un cilindrado en el torno convencional para generar una holgura entre el eje y la cubierta, permitiendo el movimiento requerido. Finalmente, para la fabricación de la ventana de la guarda de seguridad, se midió y cortó un segmento de acrílico con segueta y se taladraron los orificios correspondientes a la sujeción. Con los componentes terminados, se realizó la limpieza y el pintado final como se presenta en la Figura 73.



**Figura 73. Unión de cubierta del eje de sujeción.**

Una vez finalizada la manufactura de los componentes, se realizó el ensamble general del sistema y se colocaron los tapones en las patas de la estructura, con lo cual se concluyó el ensamble como se muestra en la Figura 74; la estructura ensamblada presentó un peso aproximado de 12 kg.



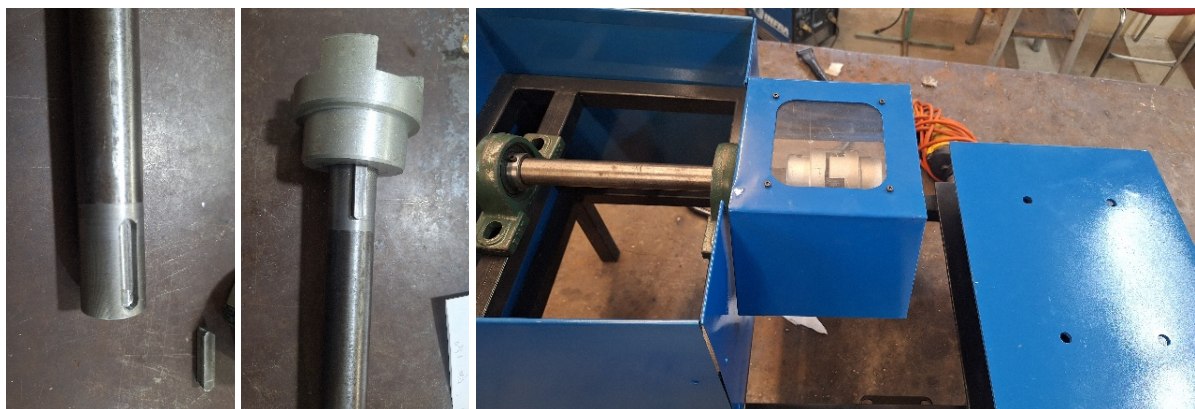
**Figura 74. Ensamble final del del prototipo.**

Para la ejecución de las pruebas experimentales del prototipo, se fabricó una estructura de soporte que simula el chasis de una máquina agrícola (Figura 75), esta estructura permite reproducir condiciones de operación cercanas a las reales y generar el movimiento rotatorio del eje mediante el acoplamiento previamente seleccionado. Asimismo, en dicha estructura se montó la guarda de seguridad para asegurar el ensamble y evaluar el desempeño del sistema durante las pruebas.



*Figura 75. Fabricación de estructura de soporte.*

Para las pruebas experimentales, se mecanizó un eje de acero a partir de un redondo de acero de 1" de diámetro, dimensión correspondiente a ejes empleados en maquinaria agrícola. Posteriormente, se realizó un cuñero de 1/4" en la fresadora vertical para asegurar el acoplamiento con el elemento de unión seleccionado, finalmente, el eje se montó en la estructura de soporte mediante dos chumaceras (Figura 76), verificando su alineación y estabilidad durante las pruebas. El ensamble final del sistema se muestra en la Figura 77.



*Figura 76. Fabricación de cuñero y ensamble del eje y chumaceras.*



Figura 77. Ensamble final del prototipo del sistema de transmisión.

### 3.5.2 Pruebas experimentales

Durante la etapa de pruebas experimentales, se evaluó el desempeño del sistema de transmisión bajo condiciones controladas y seguras, por lo que los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Electrónica Avanzada. Para el accionamiento del sistema se utilizó un motor trifásico de 5 hp, prestado por dicho laboratorio.

El laboratorio dispone de un tablero de prácticas de uso industrial alimentado por una red trifásica, acorde con la alimentación prevista para el prototipo. La conexión eléctrica se efectuó de acuerdo con la Figura 78 mediante un breaker de protección: su entrada se conectó a la toma trifásica y su salida se conectó a la entrada del VDF, posteriormente la salida del VDF se conectó a los bornes del motor (Figura 79), lo que permitió controlar el accionamiento durante las pruebas.

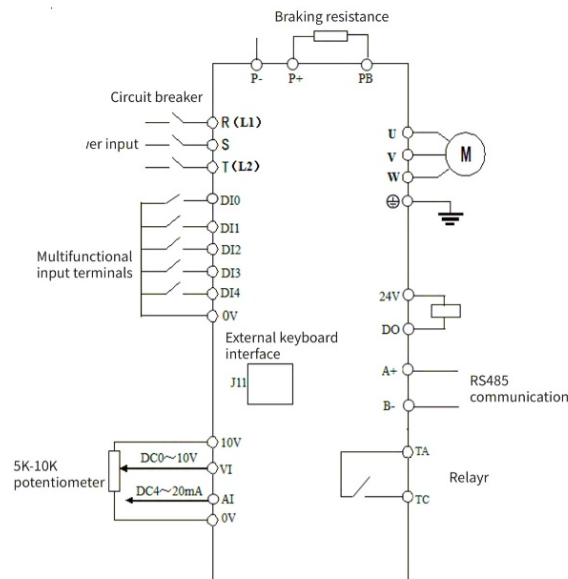
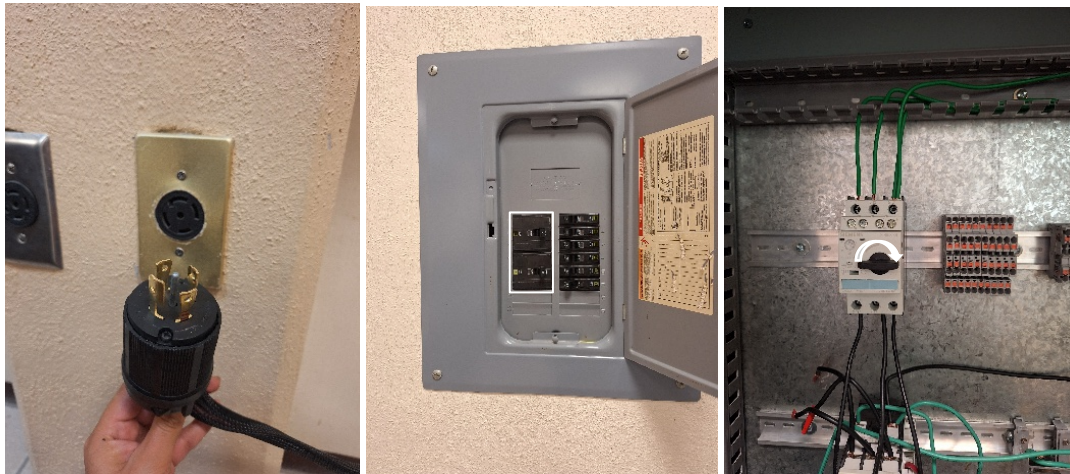


Figura 78. Método de cableado del circuito de control del VDF.



**Figura 79. Conexiones entre componentes.**

En primer lugar, para energizar el sistema se conectó el enchufe a la toma correspondiente, posteriormente se activaron los interruptores requeridos y, finalmente se encendió el breaker de protección (Figura 80), el cual incorpora un accionamiento manual, que habilita el paso de corriente al colocarse en la posición de encendido.



**Figura 80. Elementos para energizar el tablero.**

Una vez encendido el VFD, se ajustaron los parámetros de operación con base en los datos de la placa del motor (Figura 81). Esta configuración es necesaria para asegurar que el VFD opere de forma compatible con el motor, manteniendo condiciones de funcionamiento adecuadas y seguras.



Figura 81. Placa de características del motor y panel de control de VDF.

En la Tabla 22 se presentan los parámetros ajustados del VDF, correspondientes tanto a la configuración de funcionamiento como a los datos nominales del motor.

Tabla 22. Tabla de parámetros de función modificados.

Código de función	Nombre	Contenido	Valor
<b>GRUPO F0 – Parámetros básicos de funcionamiento</b>			
F0.01	Selección de la fuente de comandos	0: Canal de comando de funcionamiento del panel de operación.	0
F0.02	Selección de la fuente de frecuencia principal X	4: Potenciómetro del panel.	4
F0.05	Frecuencia máxima	Punto de referencia para los ajustes de aceleración y desaceleración.	50
F0.06	Frecuencia límite superior	La frecuencia de operación no puede exceder esta frecuencia.	50
<b>GRUPO F1 – Parámetros del motor</b>			
F1.00	Potencia nominal del motor	Establecer parámetros del motor.	3.73 kW
F1.01	Tensión nominal del motor		440 V
F1.02	Corriente nominal del motor		6.3 A

F1.03	Frecuencia nominal del motor		60 Hz
F1.04	Velocidad del motor		3475 rpm
F1.05	Resistencia del estator del motor asíncrono	Ajuste de la resistencia del estator de motores asíncronos.	0.804
F1.06	Corriente sin carga del motor asíncrono	Ajuste de la corriente en vacío de motores asíncronos.	5.1
<b>GRUPO F4 - Parámetros de protección</b>			
F4.05	Intervalo de reinicio automático por fallo	Intervalo de tiempo para el fallo automático.	3 s
F4.06	Coeficiente de protección por pérdida de fase de salida	Factor de protección por pérdida de fase de entrada.	5 s

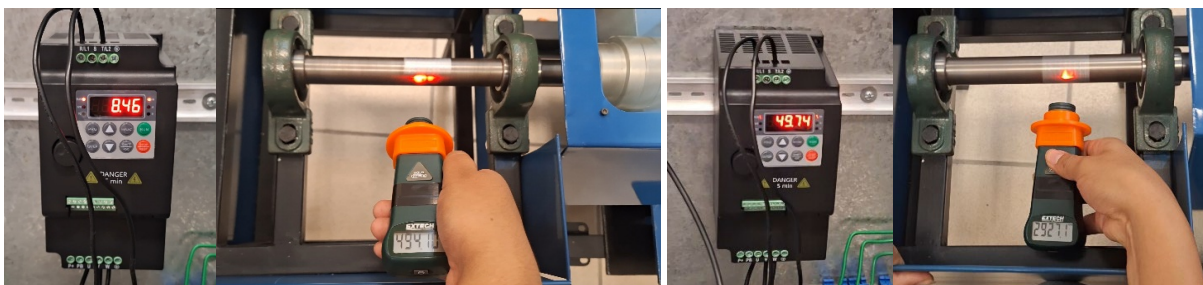
Una vez establecidos los parámetros, se realizó la prueba del sistema de transmisión mediante un tacómetro para medir la velocidad de giro del eje de prueba. Para ello se colocó una cinta reflectiva en el eje, lo que permitió al instrumento detectar y registrar la velocidad en rpm (Figura 82).

Con base en cálculos y consideraciones operativas previamente establecidos para las máquinas agrícolas seleccionadas, se estimó que el eje del mecanismo de una desgranadora de maíz opera alrededor de 494 rpm, mientras que el eje de una picadora de forraje lo hace aproximadamente a 2913 rpm. Estas velocidades se tomaron como referencia para verificar que el eje prueba alcance los valores requeridos y confirmar la compatibilidad del sistema de transmisión con condiciones de operación representativas.



**Figura 82. Pruebas del sistema de transmisión.**

Una vez realizadas las mediciones con el tacómetro, se verificó que el sistema operó bajo las condiciones establecidas, sin evidenciar inestabilidad ni sobrecarga durante el ensayo, asimismo, se comprobó que las velocidades del eje pueden ajustarse de manera continua mediante el potenciómetro del panel de control. Para obtener una velocidad aproximada de 494 rpm en el eje de prueba, el VDF se ajustó a 8 Hz, mientras que, para alcanzar aproximadamente 2913 rpm, fue necesario configurarlo a 49 Hz (Figura 83).



*Figura 83. Resultados obtenidos de las pruebas.*

En términos de montaje y operación, el ensamble del sistema resulta sencillo una vez identificados los elementos de fijación de cada componente, lo que reduce la probabilidad de errores, además, las herramientas requeridas son de uso común y fáciles de emplear. Respecto a la maniobrabilidad, la estructura puede transportarse mediante llantas, lo que facilita su reubicación y giro, no obstante, el posicionamiento con precisión puede demandar mayor esfuerzo físico. En cuanto al ajuste de altura, este se realiza de forma sencilla y controlada mediante el gato mecánico, lo cual resulta conveniente para adaptar el sistema a diferentes alturas de trabajo según el tipo de máquina agrícola.

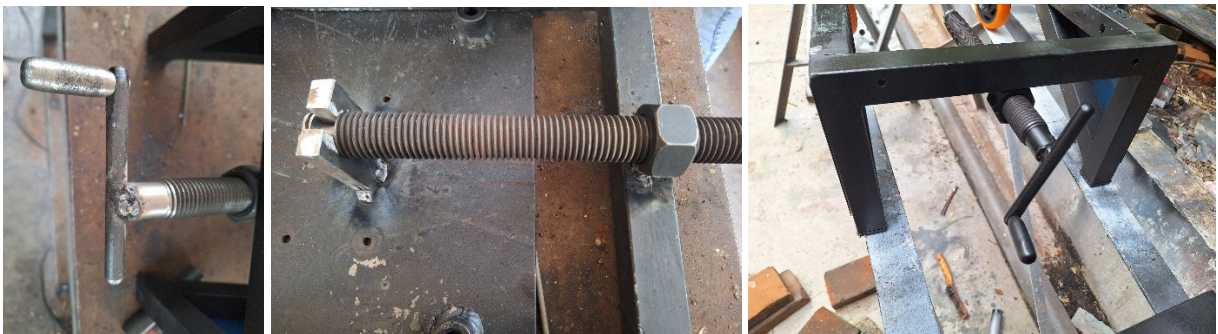
Durante las pruebas de maniobrabilidad se identificó una limitación asociada al peso del motor, ya que el desplazamiento manual sobre la base dificultó el ajuste de posición. Para mejorar esta operación, se incorporó un mecanismo de ajuste compuesto por una manivela, un espárrago roscado y una tuerca, el cual permite desplazar la plataforma longitudinalmente de manera controlada y sencilla.

La manivela se fabricó a partir de redondos de acero, mecanizados en el torno convencional, para unir las dos piezas que la conforman, se realizó un remachado. Asimismo, al espárrago se le realizó un cilindrado en una sección, con el fin de asegurar su correcto ensamble en su respectivo soporte.



*Figura 84. Componentes para desplazamiento.*

Una vez fabricados los componentes, se soldó la manivela en un extremo del espárrago, posteriormente, el soporte se soldó a la placa y la tuerca se fijó a la estructura mediante soldadura. Finalmente, se retiró la escoria, se limpiaron las uniones y los componentes, y se aplicó pintura al conjunto tal como se muestra en la Figura 85.



*Figura 85. Proceso de soldado y pintado.*

Como resultado, se obtuvo una base fácil de maniobrar y ajustar, ya que permite regular la altura para acoplarse al eje de distintas máquinas y, además incorpora un desplazamiento longitudinal que facilita el ensamble y desensamble del motor respecto a las máquinas (Figura 86).



*Figura 86. Prototipo final del sistema de transmisión.*

---

## CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

---

La metodología de desarrollo de productos propuesta por Ulrich y Eppinger permitió guiar este trabajo de manera estructurada, al proporcionar una secuencia clara de etapas para pasar desde la identificación de una necesidad hasta la validación de un prototipo. Su aplicación resultó pertinente porque facilita la organización y justificación de decisiones de diseño, integra requerimientos del usuario con criterios técnicos y reduce la incertidumbre al avanzar de forma ordenada del concepto al diseño detallado y la fase de pruebas.

Bajo este enfoque, se seleccionaron como máquinas de referencia la desgranadora de maíz y la picadora de forraje, debido a su uso extendido en las actividades agrícolas de la región de la Mixteca. El maíz constituye un cultivo relevante en la zona y el procesamiento de forraje es una necesidad recurrente para la alimentación animal. Además de su presencia en unidades de producción pequeñas y medianas, ambas máquinas presentan requerimientos mecánicos contrastantes (velocidades y cargas), lo que las convierte en un caso adecuado para evaluar un sistema de transmisión adaptable a distintos modos de operación.

Con base en la manufactura, el ensamble y la validación experimental del prototipo, se concluye que el desarrollo cumplió los objetivos planteados al documentar sistemáticamente el proceso de fabricación y establecer condiciones de prueba controladas que permitieron verificar su desempeño. La construcción del sistema, realizada en el Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura y Taller de Metales de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, se ejecutó conforme al diseño detallado y a los diagramas de operaciones y ensamble definidos, manteniendo la correspondencia entre el modelo conceptual y el prototipo físico. Asimismo, los resultados respaldan la hipótesis planteada al demostrar que el sistema de transmisión es intercambiable y adaptable, al permitir el uso de un solo motor y la implementación de ajustes asociados a distintos modos de trabajo mediante el VDF y los mecanismos de ajuste mecánico (altura y desplazamiento longitudinal), lo que sustentan su viabilidad para operar en dos máquinas agrícolas diferentes bajo condiciones operativas variables.

A partir de los requerimientos de torque y velocidad de rotación de ambas máquinas, se estimó la potencia requerida para la selección del motor. Los resultados indicaron que la condición más exigente corresponde a la picadora de forraje, con una potencia aproximada de 1.403 kW (1.882 hp), mientras que para la desgranadora se estimó 0.678 kW (0.910 hp). Considerando la eficiencia típica de motores eléctricos (75% – 80%) y un margen de seguridad, se determinó que un motor de 3 hp proporciona la capacidad suficiente para operar el sistema de transmisión de manera segura y eficiente en ambas aplicaciones.

Durante las pruebas experimentales se empleó un motor trifásico de 5 hp, debido a la disponibilidad del equipo en el laboratorio. Bajo estas condiciones, el prototipo presentó un comportamiento estable y se controló mediante un VDF configurado con parámetros nominales del motor. Las mediciones con el tacómetro confirmaron el ajuste continuo de la velocidad del eje de prueba, alcanzando valores de referencia asociados a dos escenarios representativos: aproximadamente 494 rpm con el VDF a 8 Hz, y alrededor de 2913 rpm con 49 Hz. Estos resultados indican que el sistema cubre rangos operativos compatibles con aplicaciones consideradas, lo que respalda su pertinencia como solución adaptable a distintos requerimientos de velocidad.

Desde la perspectiva operativa, se comprobó que el montaje del sistema es sencillo, con baja probabilidad de error y uso de herramientas convencionales. La incorporación de llantas, el ajuste de altura mediante el uso de un gato mecánico y el mecanismo de desplazamiento longitudinal del motor mejoraron la maniobrabilidad y facilitaron el posicionamiento durante el ensamble y desensamble, particularmente ante la limitación asociada al peso del motor.

En este trabajo no se incluyeron los costos de manufactura ni mano de obra, debido a que el proyecto se desarrolló en el contexto del apoyo que brinda la “Brigada de promoción al desarrollo”, razón por la cual no se incorporaron dichos rubros en el análisis económico.

En conjunto, los resultados confirman que el prototipo satisface los requerimientos funcionales principales: ajuste de velocidad, compatibilidad de integración, seguridad operativa y facilidad de montaje y ajuste, incorporando mejoras derivadas de la evaluación experimental. Dados los resultados de las pruebas en laboratorio, se concluye que al implementar la transmisión propuesta en este trabajo, se pueden accionar la desgranadora de maíz y la picadora de forraje con un solo motor mediante el ajuste de velocidad con un VDF, y puede facilitar la adaptación del modo de trabajo según el tipo y condición del material procesado. En la desgranadora, la regulación de velocidad en función del estado de la mazorca puede disminuir la probabilidad de fractura del olote y favorecer la obtención de granos más íntegros, mientras que, en la picadora, el ajuste permite adecuar el funcionamiento para procesar forraje verde, seco o grano. Adicionalmente, el VDF contribuye a una operación más eficiente al ajustar el motor a la demanda del proceso y evitar operar a máxima velocidad cuando no es necesario, asimismo, los arranques suaves y la reducción de picos de corriente disminuyen el esfuerzo eléctrico y mecánico, lo que contribuye a reducir el desgaste del sistema.

---

## REFERENCIAS

---

- [1] Data México, “Trabajadores en Actividades Agrícolas: Salarios, diversidad, industrias e informalidad laboral |”. Consultado: el 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/occupation/trabajadores-en-actividades-agricolas>
- [2] I. Hernández, “Gaceta del Senado”. Consultado: el 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.senado.gob.mx/65/gaceta\\_del\\_senado/documento/79153](https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_del_senado/documento/79153)
- [3] Data México, “Heroica Ciudad de Huajuapán de León: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/heroica-ciudad-de-huajuapán-de-león>
- [4] S. Salcedo y L. Guzmán, *Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de Política*. 2014.
- [5] L. C. Cholca Cacuangó y G. A. Mantilla Valencia, “Diseño y construcción de una desgranadora de maíz con capacidad de 15 qq/hora”, 2015, Consultado: el 10 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11395>
- [6] P. Pastrana Santamarta y D. Escobar Delgado, “Evolución tecnológica de las máquinas picadoras de forraje”, *Tierras: Agricultura, ISSN-e 2696-3752, ISSN 1889-0776, N.º. 276, 2019, págs. 78-85, núm. 276, pp. 78-85, 2019*.
- [7] C. Pereira, C. Maycotte, B. Restrepo, F. Mauro, A. Calle, y M. Velarde, “MAQUINARIA AGRÍCOLA”, 2011.
- [8] R. Hernández, *Metodología de la investigación*, vol. Sexta edición. 2014.
- [9] K. Ulrich y S. Eppinger, “Diseño y desarrollo de productos”, 2013.
- [10] M. P. Groover, “Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas.”, 2007. [En línea]. Disponible en: [www.FreeLibros.me](http://www.FreeLibros.me)

- [11] S. W. Chan-Tapia, A. A. Mendez-Alpuche, E. Castillo-Castillo, y S. Montiel-Culebro, "Implementación de un minitractor agrícola rentable", 2018. [En línea]. Disponible en: [www.ecorfan.org/taiwan](http://www.ecorfan.org/taiwan)
- [12] Francisca Frazetto B. y Amanda Pérez, *Introducción A La Maquinaria Agrícola*. 2012.
- [13] G. P. M. Cárdenas, B. E. L. Cruz, y O. F. B. Balseca, "FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA DESGRANADORA DE MAÍZ", *TECH CARLOS CISNEROS*, núm. 01, may 2020, doi: 10.59540/TECH.VI01.7.
- [14] "Desgranadora para maíz | Definición, funcionamiento, modelos | Raiker". Consultado: el 9 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ideasraiker.mx/desgranadora-para-maiz-definicion-funcionamiento-modelos/>
- [15] Raiker, "Venta de Maquinaria y Herramientas | Raiker". Consultado: el 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.raiker.com.mx/>
- [16] J. Zumba, "Diseño de una máquina deshojadora y desgranadora de maíz para pequeños productores del sector 'Los amarillos' del cantón Piñas", 2023.
- [17] AZTECA, "Equipos agropecuarios | Molinos Azteca". Consultado: el 9 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.molinosazteca.com/equiposagropecuarios/>
- [18] E. Mercedes *et al.*, "Creación de una máquina picadora y trituradora de especies forrajeras para alimentación de ganado en la provincia de Chimborazo, parroquia Calpi", *Ciencia Digital*, vol. 3, núm. 2, pp. 109-123, mar. 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v9i2.378.
- [19] SWEDISH HUSKY POWER, "Picadoras de Forraje - Husky Power". Consultado: el 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://husky-power.mx/collections/picadora-de-forraje>
- [20] MAS FERRE, "Trituradora-picadora para forraje con motor eléctrico". Consultado: el 10 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.masferreterias.com.mx/detalle?sku=24185>
- [21] J. C. Flores García, "Sistemas de transmisión mecánica", 2012, Consultado: el 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/15454>
- [22] "Diseño y construcción de una instalación para el estudio de las transmisiones de potencia mecánica - CORE". Consultado: el 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/works/37025724>

- [23] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, “Engranajes: descripción general”, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, vol. 136, núm. 1, pp. 669–681, 2012.
- [24] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, vol. Cuarta edición. Pearson/Prentice Hall, 2006.
- [25] L. V. Vanegas, “Diseño de Elementos de Máquinas”, 2018.
- [26] D. N. Reshetov, *Atlas de máquinas y mecanismos*, 8a ed. 2007.
- [27] M. P. Groover, *Introducción a los procesos de manufactura*. 2014.
- [28] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta. 2008. [En línea]. Disponible en: [www.pearsoneducacion.net/kalpakjian](http://www.pearsoneducacion.net/kalpakjian)
- [29] A. Besa y F. Valero, “Diseño de máquinas Diseño de máquinas”, 2016, Consultado: el 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)
- [30] R. L. Mott, *Machine elements in mechanical design*, vol. 4 edición. Pearson/Prentice Hall, 2006.
- [31] S. Čorović, D. Miljavec, S. Čorović, y D. Miljavec, “Modeling of a C-Frame Reluctance-Enhanced Shaded-Pole Induction Motor—Study of Shaded-Coil Design”, *Actuators 2025, Vol. 14*, vol. 14, núm. 8, jul. 2025, doi: 10.3390/ACT14080368.
- [32] X. Guo, X. Hu, y S. Zhang, “Application status of variable-frequency drive in hydrogen fuel cell air compressors from an industrial viewpoint: A review”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64, p. 103716, abr. 2024, doi: 10.1016/J.SETA.2024.103716.
- [33] J. G. López, M. Á. Jiménez, y J. Sánchez, “Despliegue de la Función de Calidad para el Diseño de Limpiador Automático de Rodillo”, *Ciencia Tecnológica*, vol. 52, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- [34] D. Maritan, *Practical Manual of Quality Function Deployment*. 2015. doi: 10.1007/978-3-319-08521-0.
- [35] M. Galetto, F. Franceschini, D. A. Maisano, y L. Mastrogiacomo, “Engineering characteristics prioritisation in QFD using ordinal scales: a robustness analysis”, *European J. Industrial Engineering*, vol. 12, núm. 2, 2018, doi: 10.1504/EJIE.2018.090617.
- [36] R. Wolniak, “THE ROLE OF QFD METHOD IN CREATING INNOVATION”, *SYSTEMY WSPOMAGANIA W INŻYNIERII PRODUKCJI*, vol. 15, 2016.
- [37] R. B. Chase, F. R. Jacobs, y N. J. Aquilano, “Administración de operaciones-producción y cadena de suministro chase Aquilano”, 2009.

- [38] R. García Criollo, *Estudio del trabajo Ingeniería de métodos y medición del trabajo*, Segunda. 2005.
- [39] Tupac Acoplamiento SA, “Fabricación de acoples”, Como seleccionar un acoplamiento.
- [40] ComInTec, “Acoplamiento flexibles y acoplamiento rígidos”, Acoplamiento flexibles - Acoplamiento rígidos: Guía para la elección.
- [41] SKF Group, “Couplings”, Coupling selection guide.
- [42] A. S. Ba-Thunya, R. Khopkar, K. Wei, y H. A. Toliyat, “Single phase induction motor drives-a literature survey”, *IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 911–916, 2001, doi: 10.1109/IEMDC.2001.939428.
- [43] M. Curtis, *Planeación de procesos*. 1996.

---

## APÉNDICE A. ENCUESTA

---

### **Identificación de las necesidades de los clientes para el diseño de una transmisión de potencia adaptable a 2 máquinas agrícolas**

¿Con qué frecuencia utiliza estas máquinas (desgranadora y picadora)?

¿Qué marcas y modelos de desgranadoras de maíz y picadoras de forraje opera?

¿Qué capacidad tiene la máquina que utiliza?

¿Qué marca de motor utiliza y qué potencia tiene?

¿Con qué frecuencia realiza mantenimiento a las transmisiones de sus máquinas actualmente?

¿Qué problemas, defectos o quejas tiene sobre el producto ya existente?

¿Qué características considera indispensables en una transmisión para que sea efectiva en su operación?

¿Cuál es el volumen de producción diario o por temporada que maneja con sus máquinas?

¿Cuánto tiempo (minutos/horas) usa la máquina?

¿Necesita que la transmisión soporte variaciones de carga o volumen de trabajo? ¿En qué medida?

¿Considera que la velocidad es más importante, en comparación con otros factores como la eficiencia o el consumo de energía?

¿Qué aspectos de la transmisión actual le gustaría mejorar en términos de mantenimiento?

¿Qué expectativas tiene en términos de la durabilidad y resistencia de la transmisión?

¿Qué tan importante sería si el nuevo producto ofreciera una velocidad variable?

¿Qué tan fácil es usar el producto que ya existe?

¿Conoce algún otro producto que ofrezca las mismas características/funcionamiento?

¿Qué características buscan de la máquina que no pueden encontrar en las existentes?

¿Se necesita de capacitación o conocimientos especializado para que las personas operen esta máquina?

¿Prefiere un diseño de transmisión más automatizado o uno que ofrezca control manual detallado?

¿Qué limitaciones de espacio existen en las áreas donde opera las máquinas?

¿Ha enfrentado problemas frecuentes con transmisiones anteriores que desearía se solucionaran en este nuevo diseño?

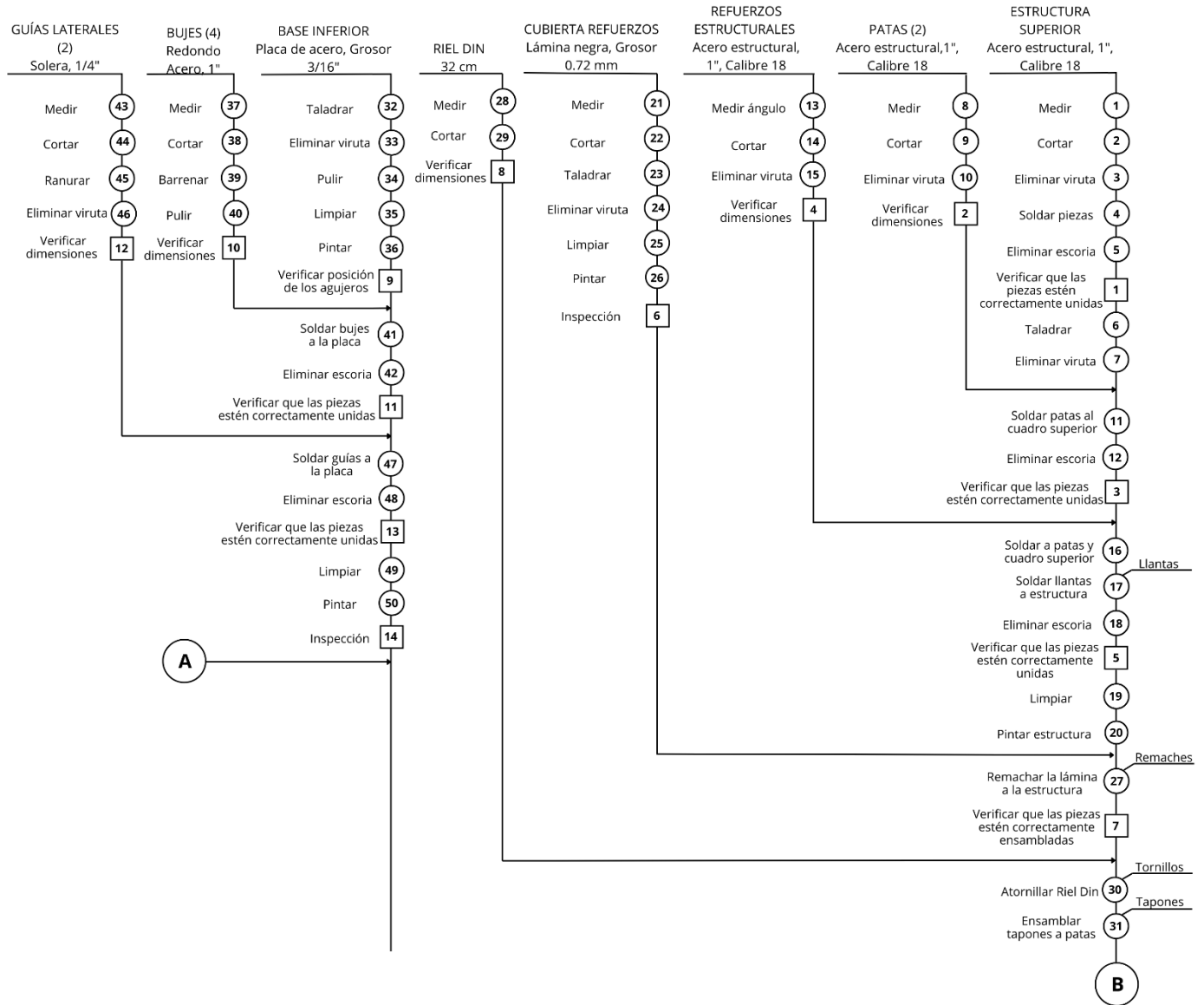
¿Está interesado en soluciones que ofrezcan una mejor relación costo-beneficio a largo plazo?

¿Puede compartir experiencias específicas donde la transmisión actual no cumplió con sus expectativas?

¿Qué tan importante es para usted que la transmisión diseñada sea de bajo peso?

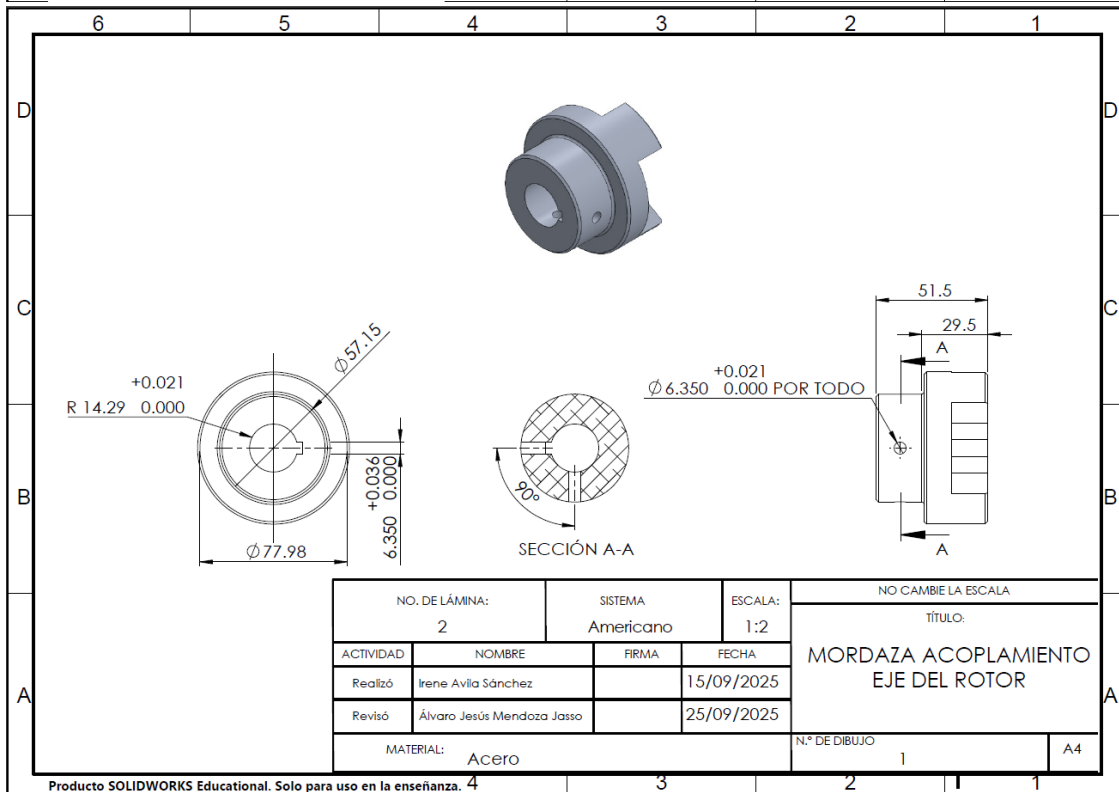
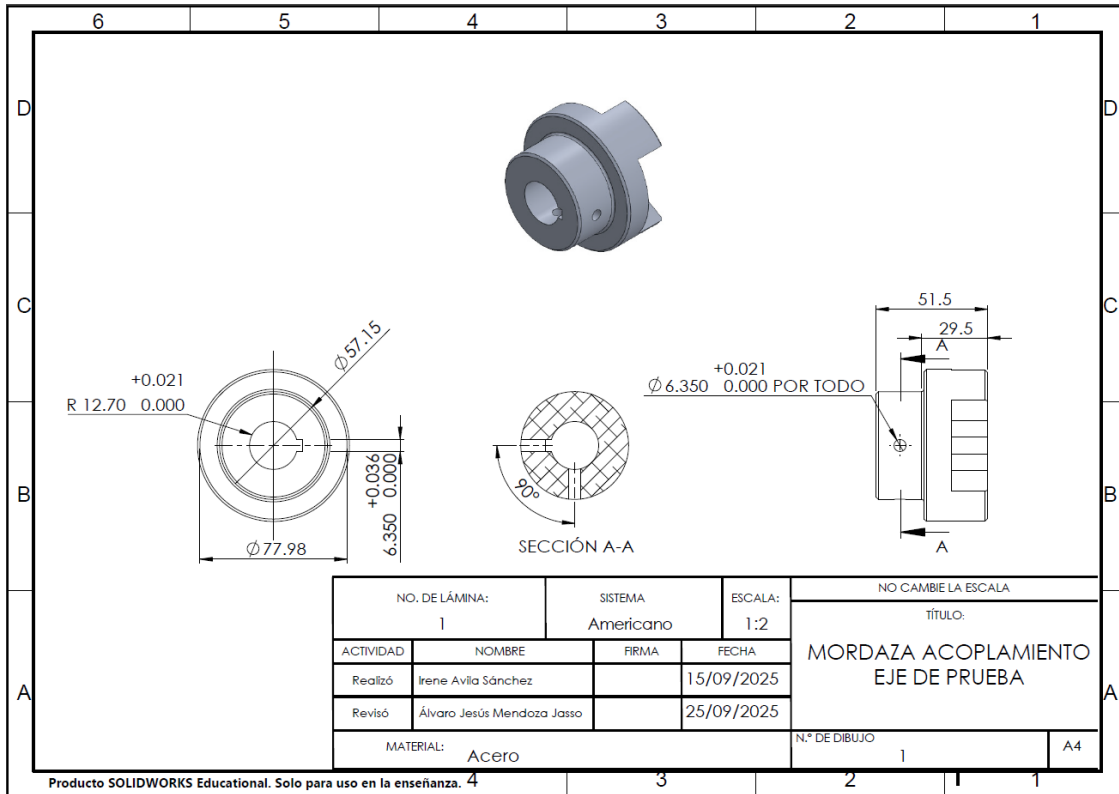
# APÉNDICE B. DIAGRAMA DE OPERACIONES

## Parte 1:





# APÉNDICE C. PLANOS



En la soldadura se utilizará el electrodo E6013 y soldadura por arco manual

Nota: para longitudes de los perfiles, ver la lámina 4.

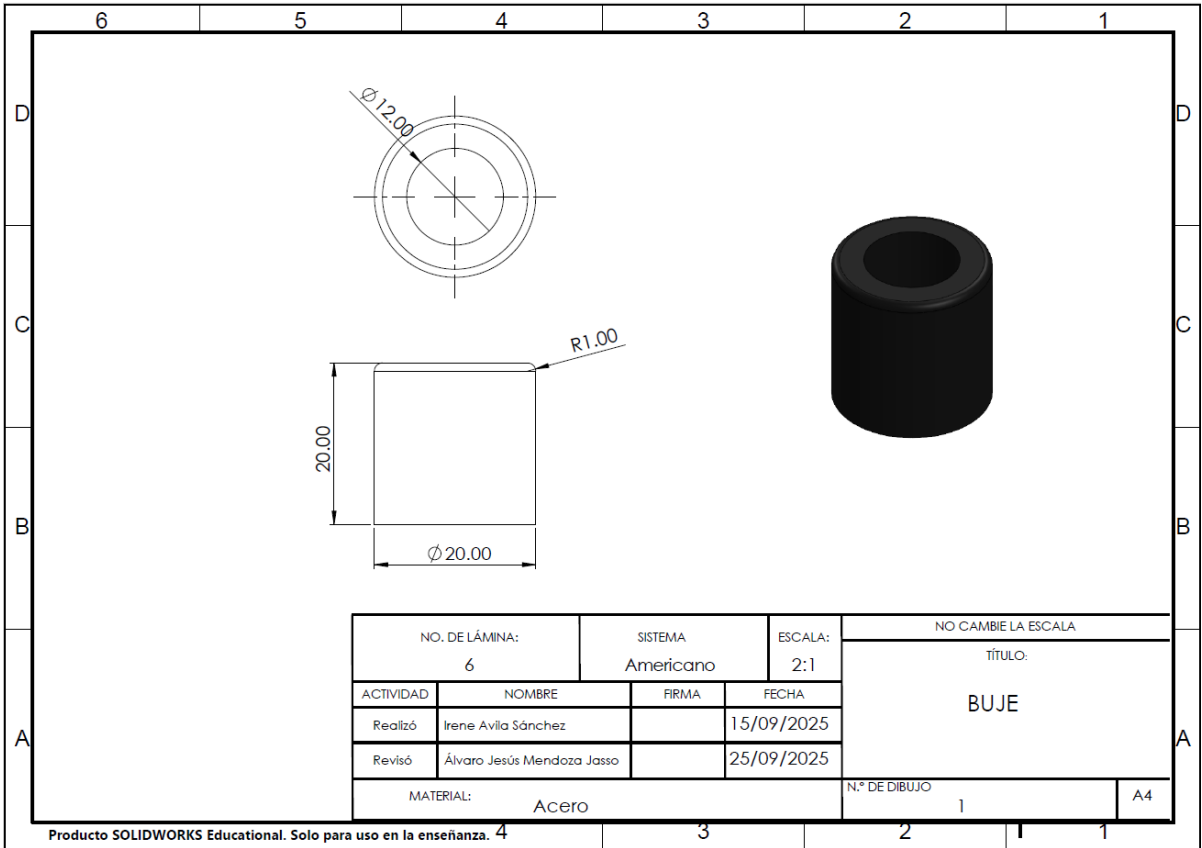
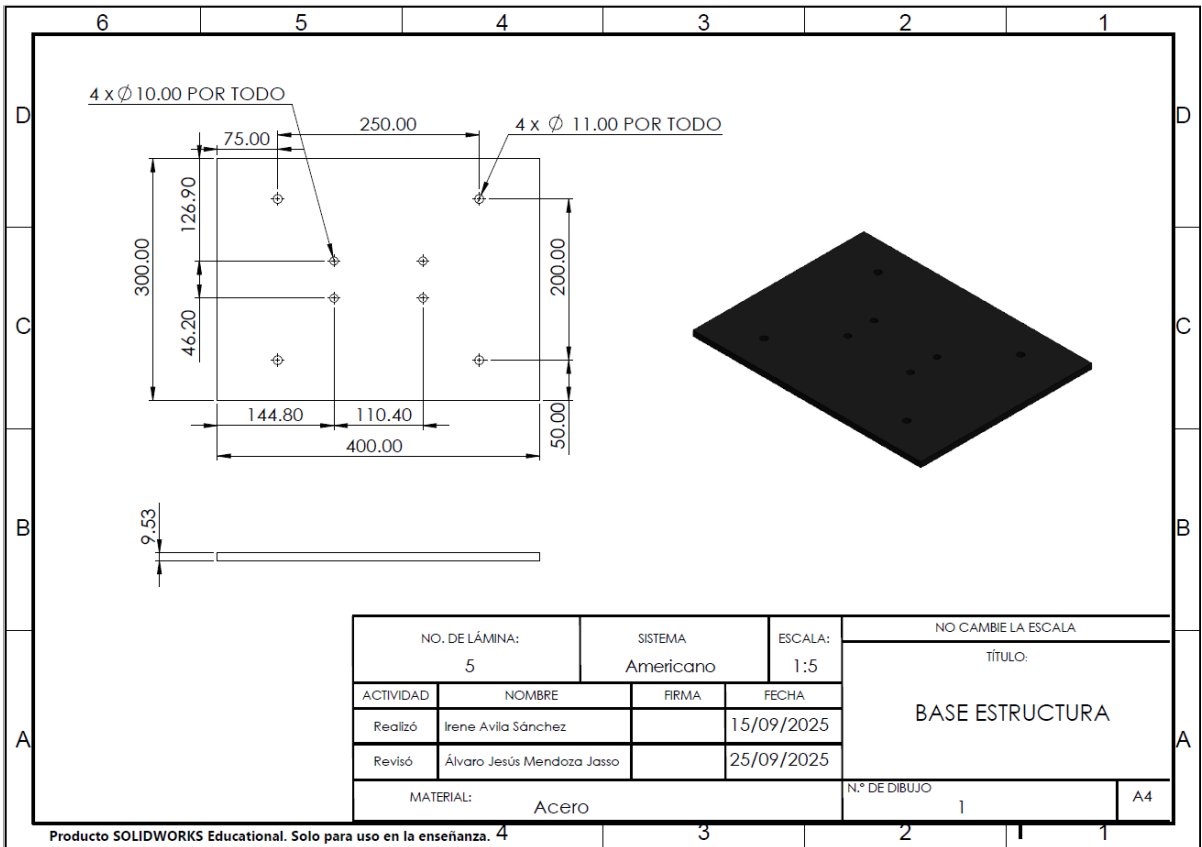
NO. DE LÁMINA: 3		SISTEMA Americano		ESCALA: 1:10	NO CAMBIE LA ESCALA	
ACTIVIDAD		NOMBRE		FIRMA	FECHA	
Realizó		Irene Avila Sánchez			15/09/2025	
Revisó		Álvaro Jesús Mendoza Jasso			25/09/2025	
MATERIAL: Perfil Tubular Cuadrado 1 1/4", calibre 18					N.º DE DIBUJO 1	A4

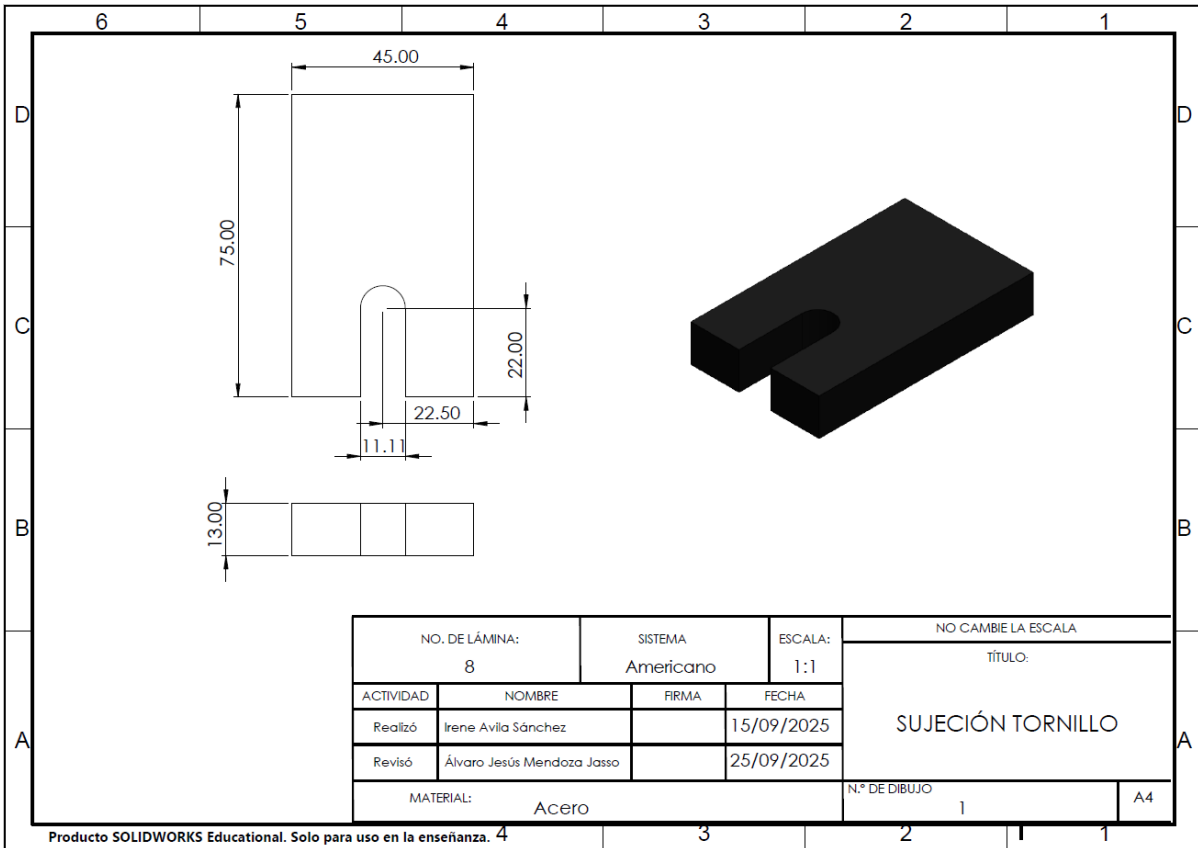
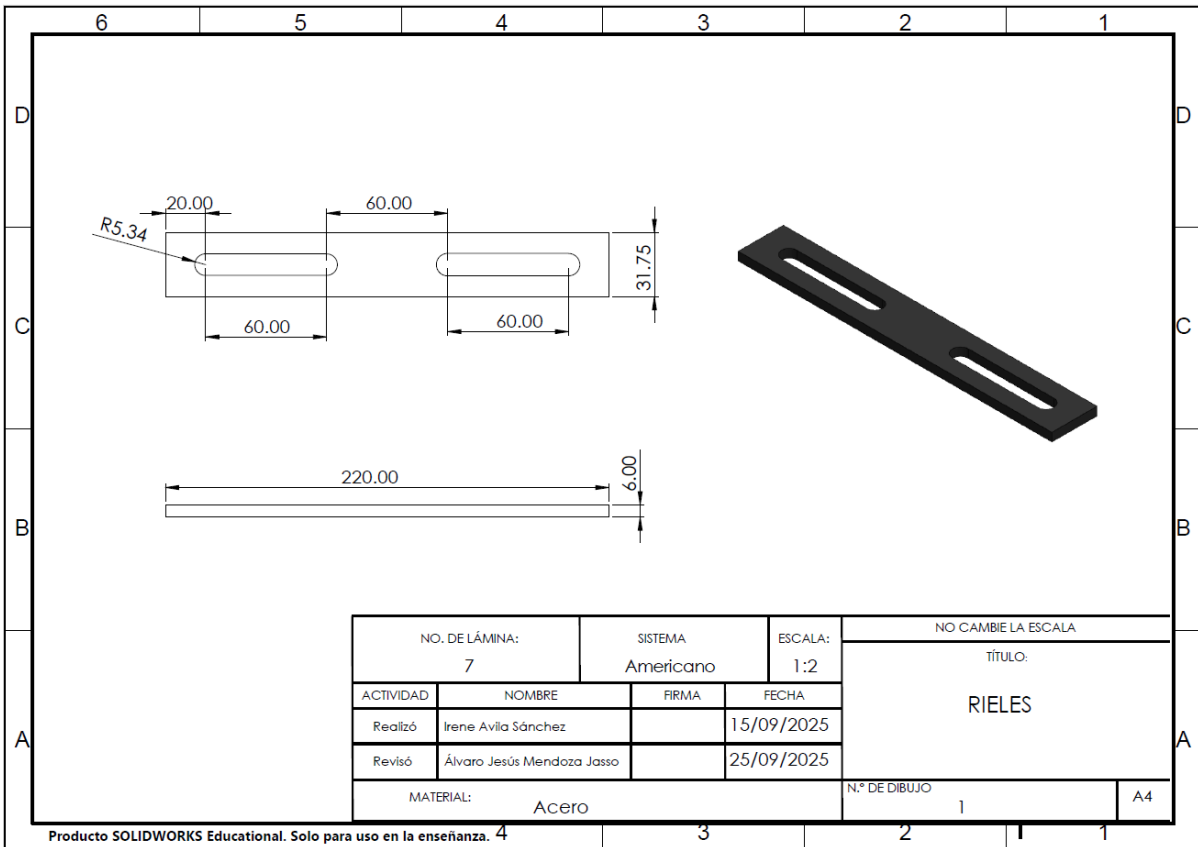
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

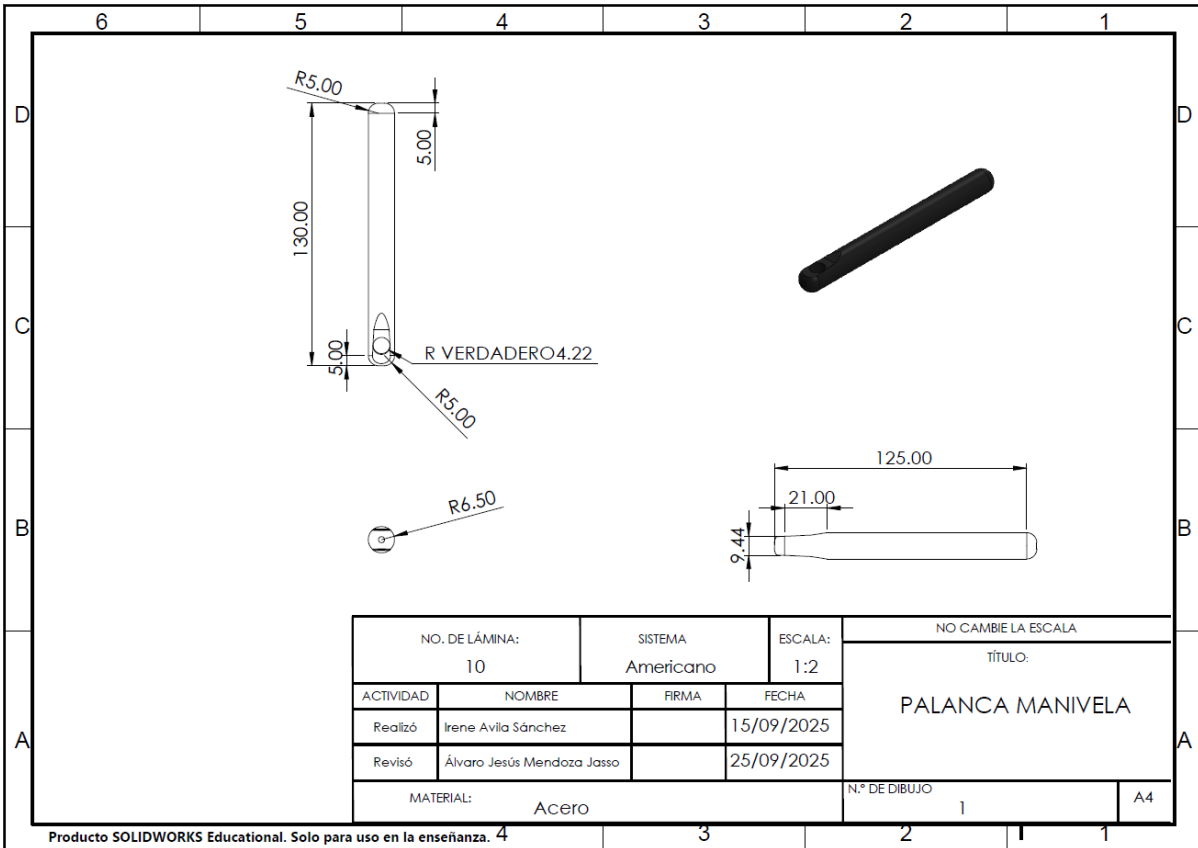
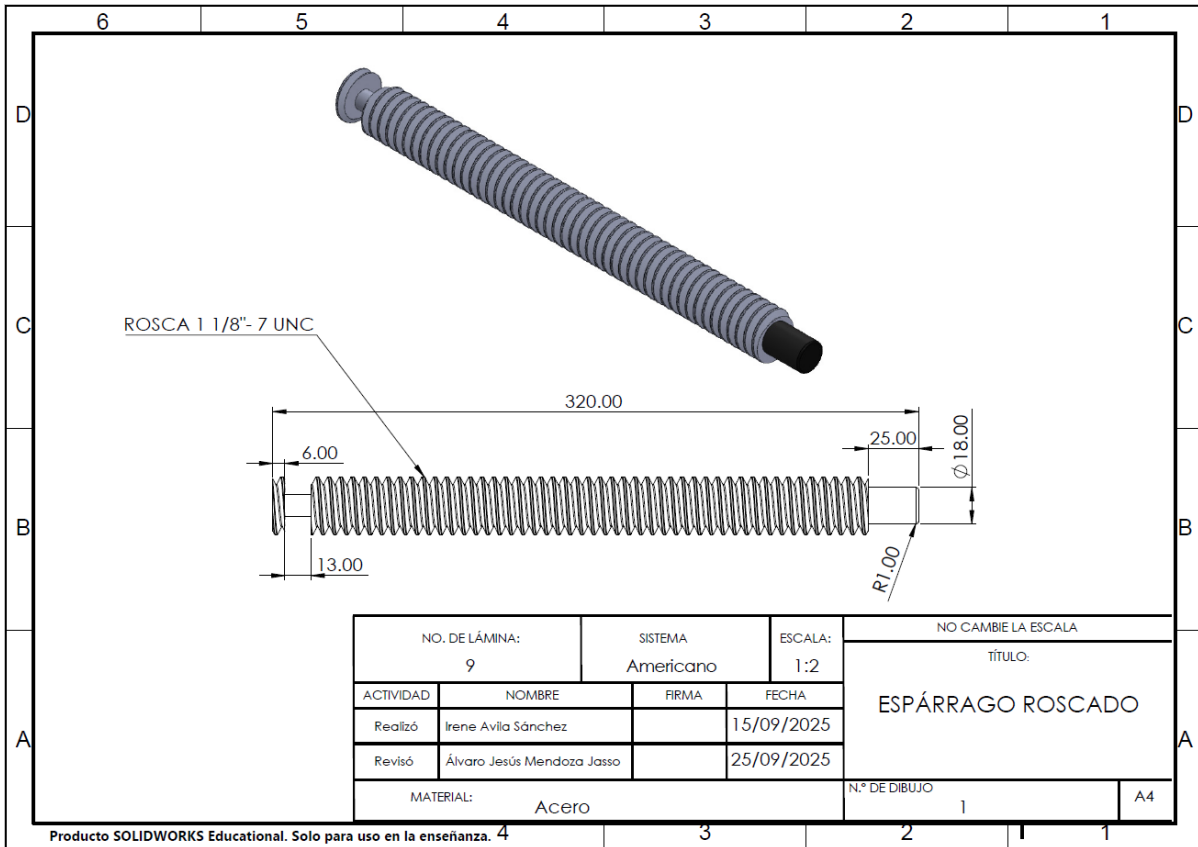
Nº de elemento	Cantidad	ÁNGULO1	ÁNGULO2	LONGITUD
1	2	45°	0°	560
2	2	60°	30°	304.85
3	2	0°	0°	168.2
4	1	45°	45°	356.9
5	2	90°	30°	350 x 190

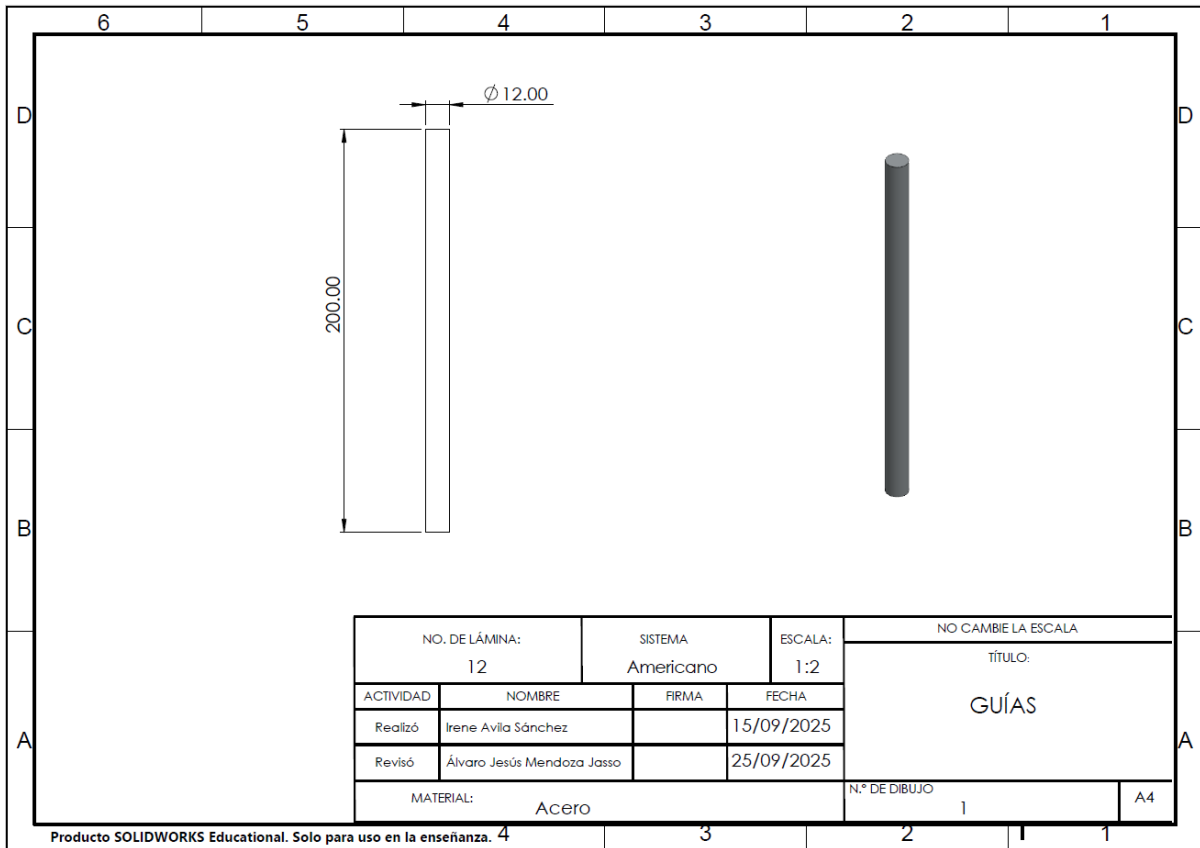
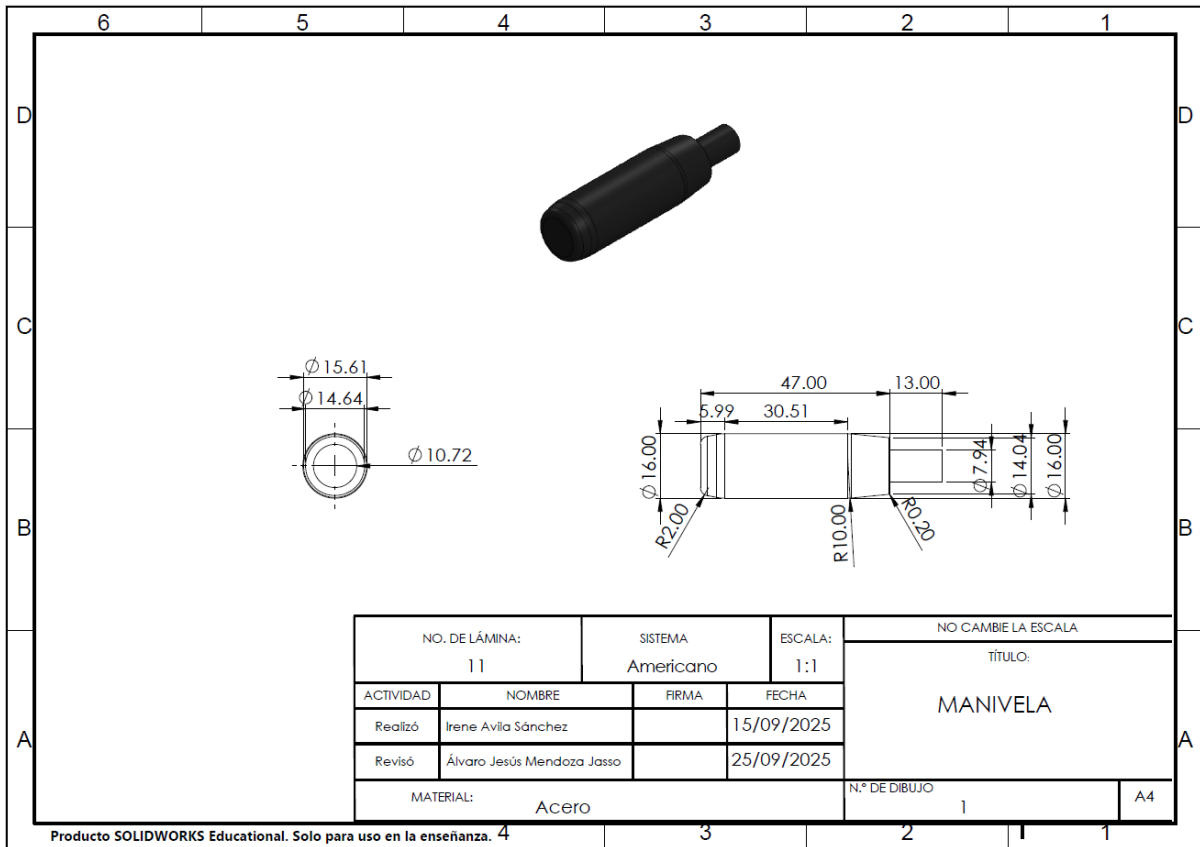
NO. DE LÁMINA: 4		SISTEMA Americano		ESCALA: 1:10	NO CAMBIE LA ESCALA	
ACTIVIDAD		NOMBRE		FIRMA	FECHA	
Realizó		Irene Avila Sánchez			15/09/2025	
Revisó		Álvaro Jesús Mendoza Jasso			25/09/2025	
MATERIAL: Perfil Tubular Cuadrado 1 1/4", calibre 18					N.º DE DIBUJO 2	A4

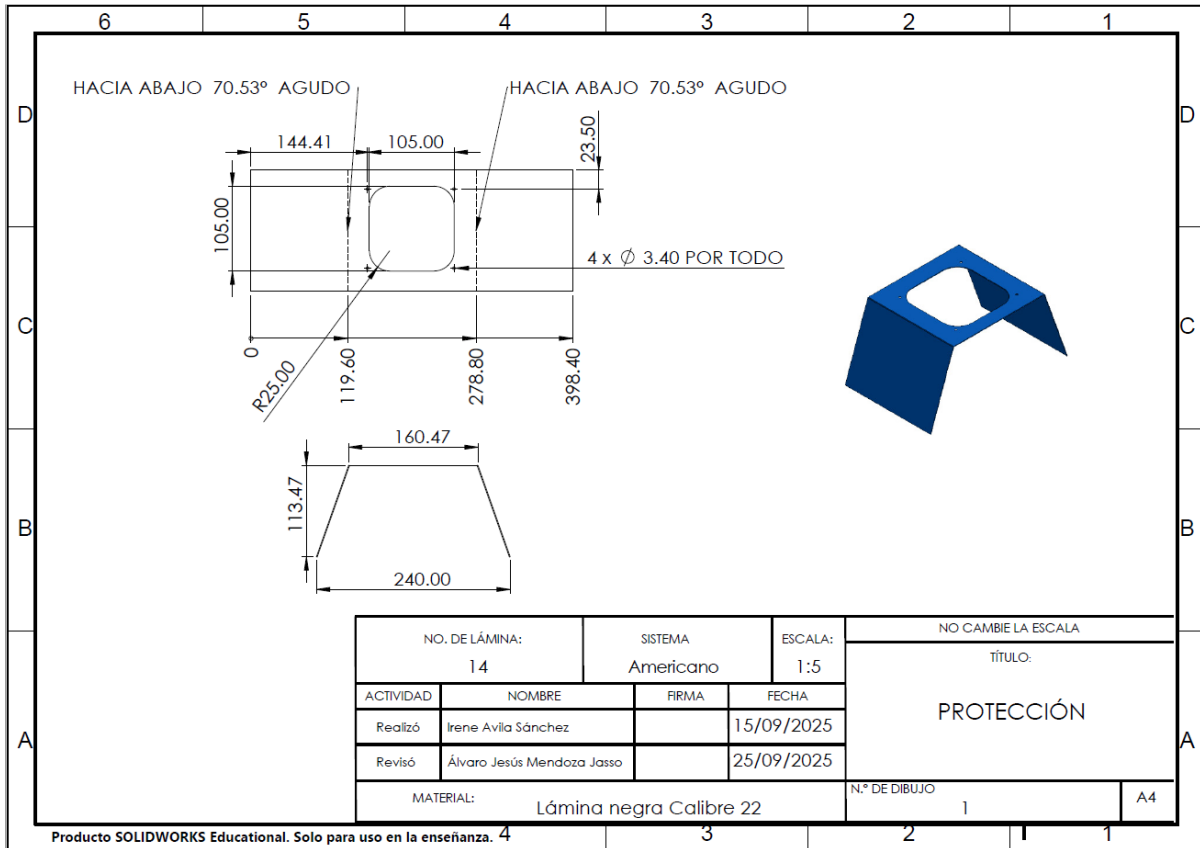
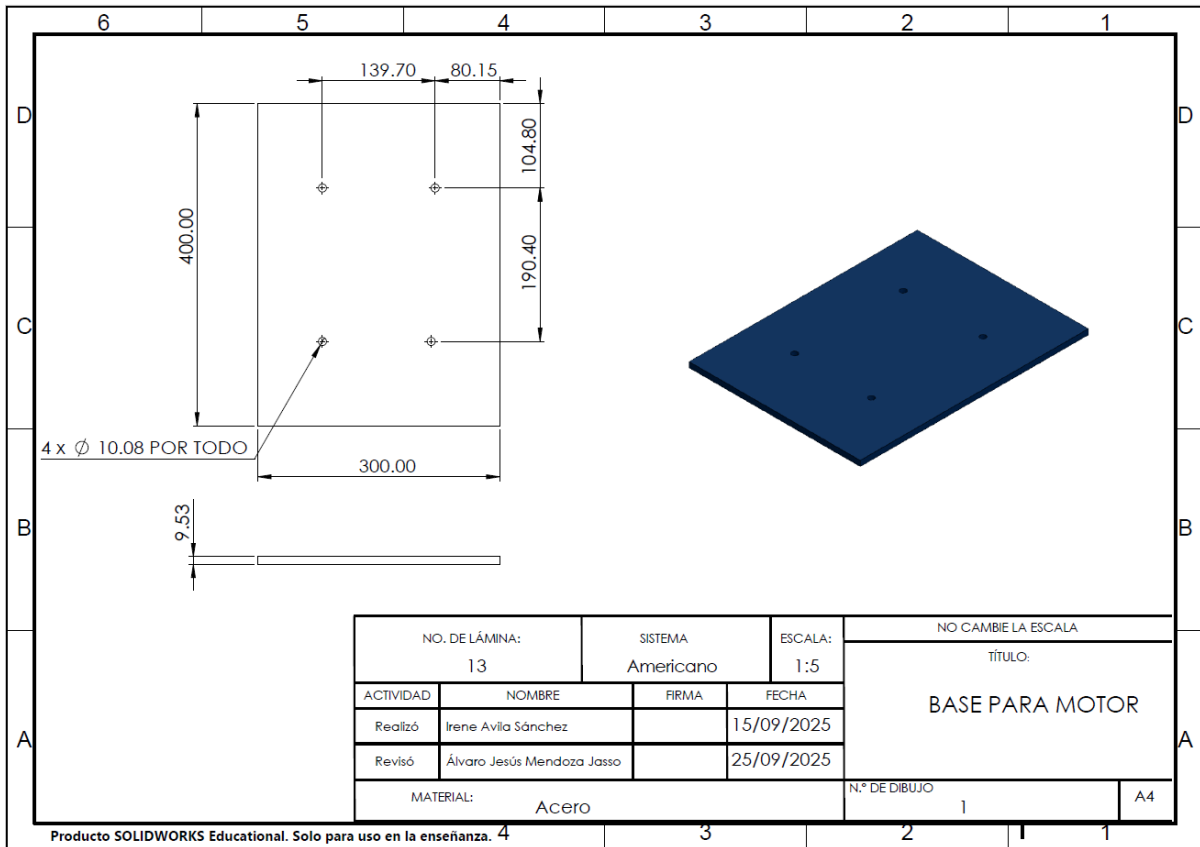
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

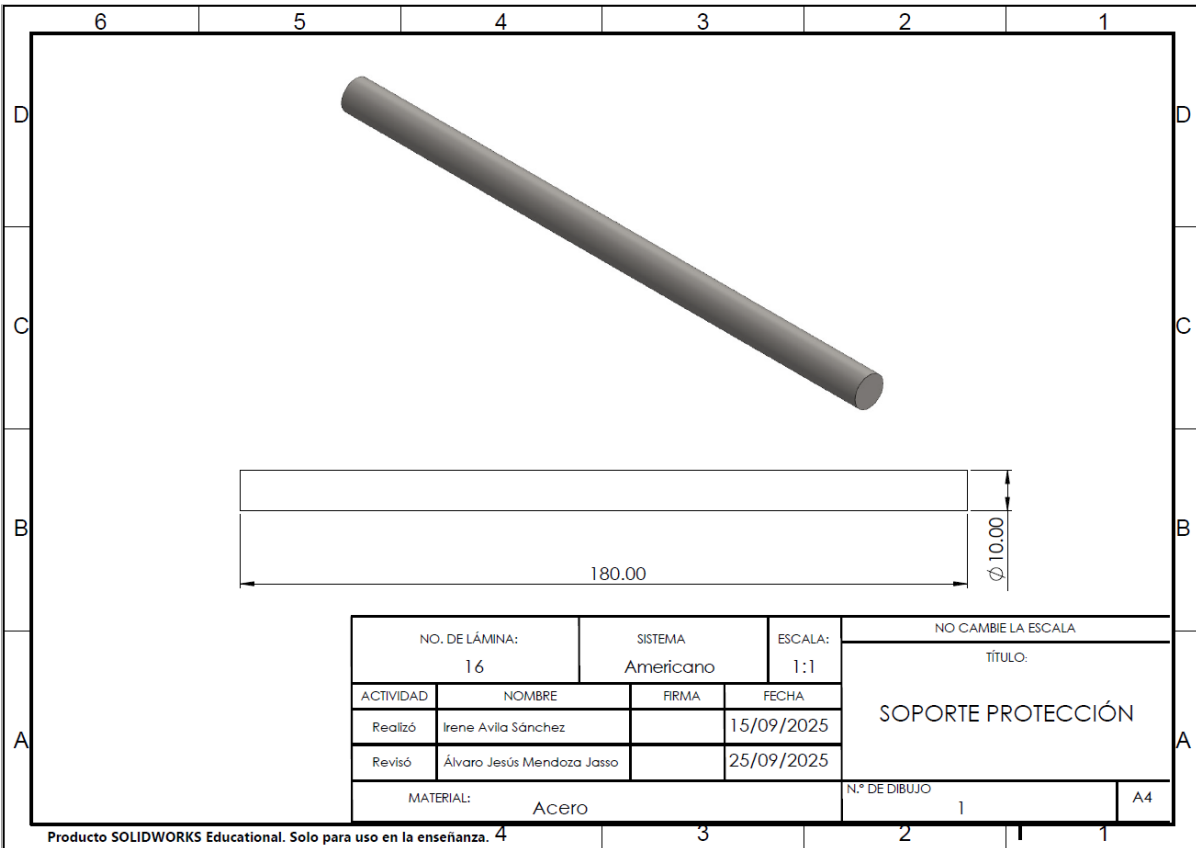
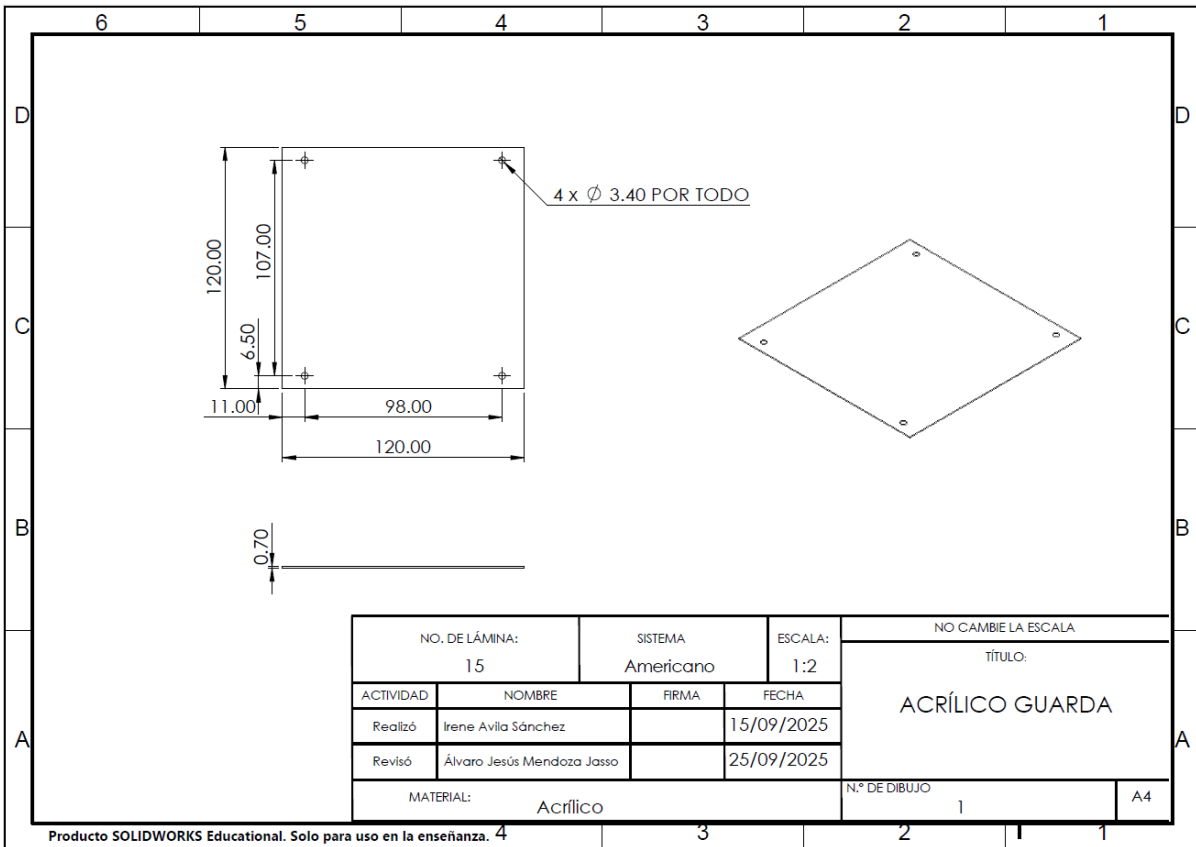


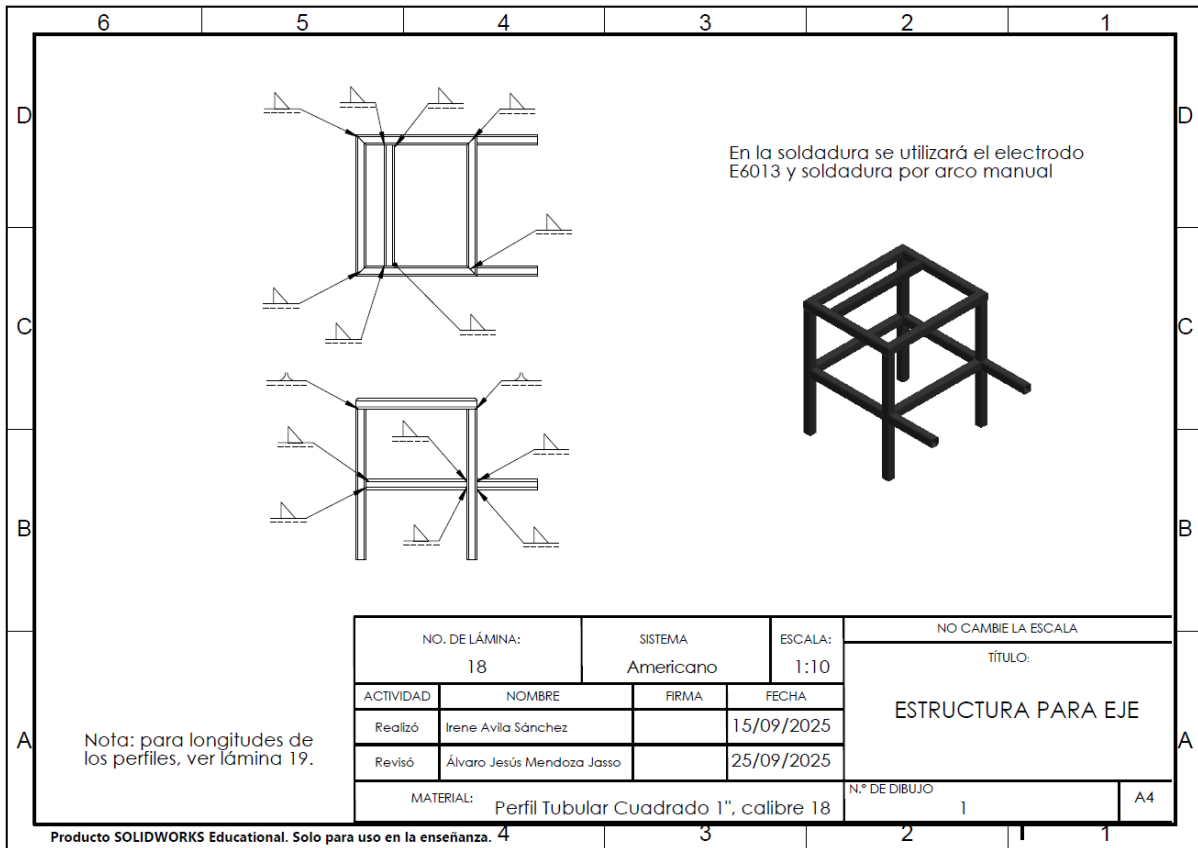
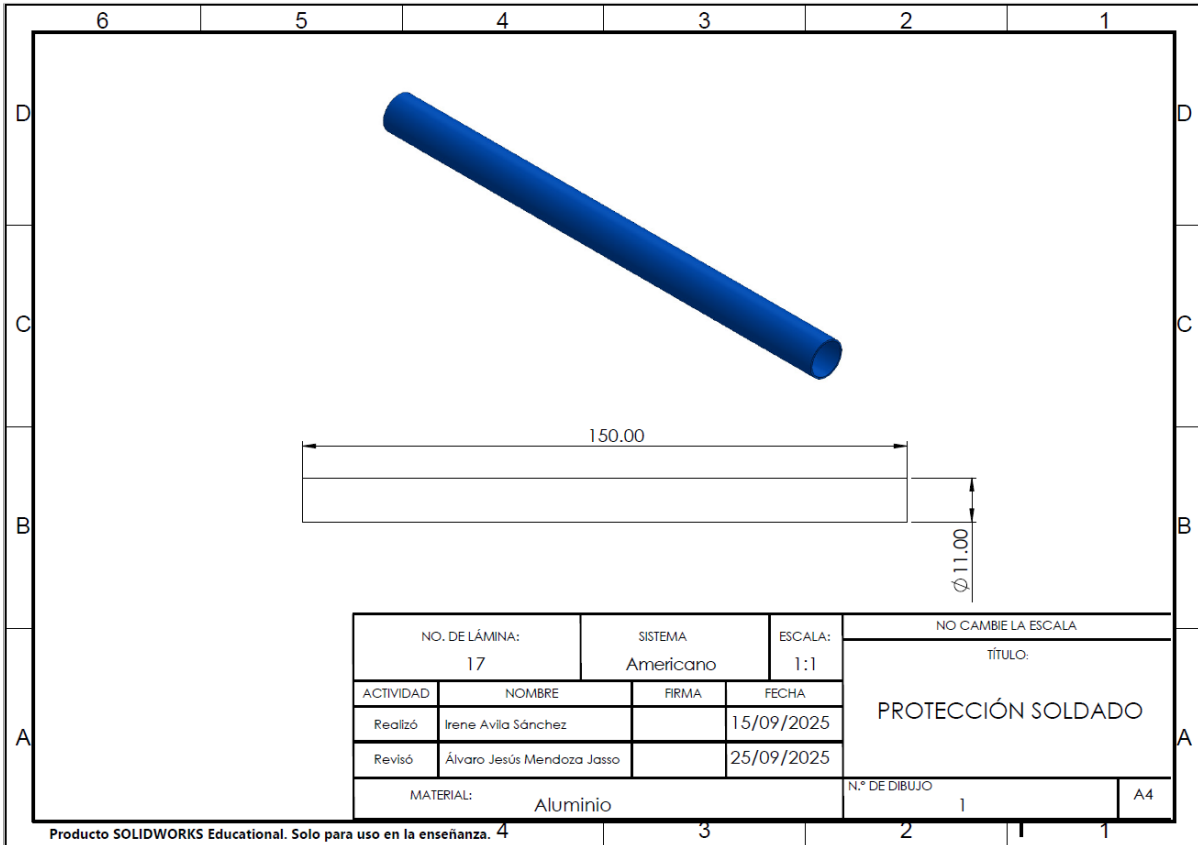












N° de elemento	Cantidad	ÁNGULO1	ÁNGULO2	LONGITUD
1	2	45°	45°	350
2	4	0°	0°	299.2
3	4	0°	0°	374.6
4	2	0°	0°	249.2
5	2	0°	0°	150
6	2	45°	45°	300

NO. DE LÁMINA: 19		SISTEMA Americano		ESCALA: 1:10	NO CAMBIE LA ESCALA	
ACTIVIDAD		NOMBRE		FIRMA	FECHA	
Realizó		Irene Avila Sánchez			15/09/2025	
Revisó		Álvaro Jesús Mendoza Jasso			25/09/2025	
MATERIAL: Perfil Tubular Cuadrado 1", calibre 18					N.º DE DIBUJO 2	A4

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

DETALLE A  
ESCALA 2 : 5

NO. DE LÁMINA: 20		SISTEMA Americano		ESCALA: 1:5	NO CAMBIE LA ESCALA	
ACTIVIDAD		NOMBRE		FIRMA	FECHA	
Realizó		Irene Avila Sánchez			15/09/2025	
Revisó		Álvaro Jesús Mendoza Jasso			25/09/2025	
MATERIAL: Acero					N.º DE DIBUJO 1	A4

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.