

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de materiales y manufactura de la estructura para una máquina elíptica de bambú

Trabajo de graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado por

Francisco Alejandro Paz Ramírez

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de materiales y manufactura de la estructura para una máquina elíptica de bambú

Trabajo de graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado por
Francisco Alejandro Paz Ramírez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2020

Vo. Bo.:



(f) _____

(Ing. Víctor Hugo Ayerdi)

Tribunal Examinador



(f) _____

(Ing. Víctor Hugo Ayerdi)

(f) _____

(Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro)

(f) _____

(Ing. Rony José Herrarte Estévez)

Fecha de aprobación: Guatemala (Jueves 18 de Junio del 2020)

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| Lista de tablas..... | VII |
| Lista de figuras..... | VIII |
| Resumen..... | X |
| | |
| I. Introducción..... | 1 |
| II. Objetivos..... | 2 |
| III. Justificación..... | 3 |
| IV. Marco teórico..... | 4 |
| A. Taxonomía y clasificación..... | 4 |
| B. Morfología..... | 4 |
| C. Composición biológica del bambú..... | 6 |
| D. Tratamientos y preservación..... | 7 |
| E. Disponibilidad del recurso en Guatemala..... | 8 |
| F. Antecedentes en Guatemala. | 9 |
| G. Especies en Guatemala..... | 10 |
| H. Estudios previos realizados acerca de las propiedades mecánicas y fiscas del bambú..... | 11 |
| I. Uniones..... | 17 |
| J. Tipo de fallas | 20 |
| K. Norma E 100..... | 21 |
| L. Mecanismos y estructuras..... | 23 |
| V. Metodología | 24 |
| A. Definición de requisitos..... | 24 |
| B. Conceptos operacionales..... | 25 |
| C. Selección de especies de bambú..... | 25 |
| D. Diseño preliminar..... | 26 |
| E. Selección de especie de bambú para cada pieza..... | 28 |
| F. Lista de materiales para construcción del prototipo..... | 33 |

| | |
|--|----|
| G. Evaluación de calidad del bambú adquirido para el proyecto..... | 40 |
| H. Manufactura..... | 43 |
| I. Evaluación del prototipo..... | 60 |
| J. Fallas..... | 72 |
| K. Observaciones de desalineación de piezas | 73 |
| VI. Resultados..... | 77 |
| A. Requisitos..... | 78 |
| B. Costo de materiales..... | 81 |
| C. Dimensiones finales del mecanismo..... | 82 |
| D. Discusión de resultados..... | 83 |
| VII. Conclusiones..... | 89 |
| VIII. Recomendaciones..... | 91 |
| IX. Bibliografía..... | 92 |
| X. Anexos..... | 93 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 1. Especies de bambú en Guatemala..... | 10 |
| Tabla 2. Influencia de propiedades físicas del bambú expuesto a esfuerzos | 11 |
| Tabla 3. Puntos fuertes y débiles del bambú sometido a esfuerzos..... | 13 |
| Tabla 4. Resultados de ensayo a compresión..... | 15 |
| Tabla 5. Resultado de ensayo a tensión..... | 15 |
| Tabla 6. Módulo de ruptura en cilindro promedial | 16 |
| Tabla 7. Esfuerzo cortante | 16 |
| Tabla 8. Ventajas y desventajas del uso del bambú como materia para construcción..... | 16 |
| Tabla 9. Requisitos para selección y mantenimiento de bambú..... | 24 |
| Tabla 10. Conceptos operacionales..... | 25 |
| Tabla 11. Esfuerzos presentes en las piezas del soporte principal..... | 28 |
| Tabla 12. Esfuerzos presentes en las piezas del mecanismo de 4 barras..... | 28 |
| Tabla 13. Requerimientos del soporte principal | 31 |
| Tabla 14. Requerimientos de ejes..... | 31 |
| Tabla 15. Requerimientos de mecanismo de 4 barras..... | 32 |
| Tabla 16. Lista de materiales que componen el prototipo..... | 33 |
| Tabla 17. Herramientas y maquinara utilizada para la manufactura del prototipo..... | 34 |
| Tabla 18. Dimensiones de D. Asper A..... | 35 |
| Tabla 19. Dimensiones de D. Asper B..... | 35 |
| Tabla 20. Dimensiones de D. Asper C..... | 36 |
| Tabla 21. Dimensiones de D. Asper D..... | 36 |
| Tabla 22. Dimensiones de G. Verticillata A..... | 36 |
| Tabla 23. Dimensiones de G. Verticillata B..... | 37 |
| Tabla 24. Dimensiones de G. Verticillata C..... | 37 |
| Tabla 25. Dimensiones de G. Verticillata D..... | 37 |
| Tabla 26. Dimensiones de G. Angustifolia A..... | 38 |
| Tabla 27. Dimensiones de G. Angustifolia B..... | 38 |
| Tabla 28. Dimensiones de G. Angustifolia C..... | 39 |
| Tabla 29. Dimensiones de G. Angustifolia D..... | 39 |
| Tabla 30. Evaluación de requisitos para los culmo de bambú..... | 40 |
| Tabla 31. Dimensiones del mecanismo de 4 barras..... | 51 |
| Tabla 32. Resultados de requerimientos de soporte principal..... | 78 |
| Tabla 33. Resultados de requerimientos de ejes..... | 79 |
| Tabla 34. Resultados de requerimientos de mecanismo de 4 barras..... | 79 |
| Tabla 35. Costos de materiales en quetzales..... | 81 |
| Tabla 36. Comparación de dimensiones del mecanismo de 4 barras..... | 82 |
| Tabla 37. Iteraciones de bambú..... | 82 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Composición del bambú. | 4 |
| Figura 2. Macroestructura y microestructura del bambú. | 6 |
| Figura 3. Áreas aptas cercanas a vías asfaltadas para el desarrollo de bambú. | 8 |
| Figura 4. Unión de boca de pescado. | 17 |
| Figura 5. Perno pasante, fijando 2 o más culmos. | 18 |
| Figura 6. Instalación de perno tensor. | 18 |
| Figura 7. Unión longitudinal. | 19 |
| Figura 8. Relleno de mortero. | 19 |
| Figura 9. Unión perpendicular con amarre. | 20 |
| Figura 10. A) Falla por aplastamiento, b) Falla por tensión de las fibras, c) Falla por corte, d) Falla por pandeo general de las fibras en direcciones), e) Falla por pandeo general de las fibras en dirección externa. | 20 |
| Figura 11. Falla por pandeo local de las fibras en presencia de nudo. | 21 |
| Figura 12. Separación de nudo y unión de bambú. | 22 |
| Figura 13. Vista isométrica de máquina elíptica diseño preliminar (Izquierda); Vista lateral de máquina elíptica diseño preliminar (Derecha). | 26 |
| Figura 14. Estructura principal (Soporte principal). | 27 |
| Figura 15. Culmo + platina (Eslabón). | 27 |
| Figura 16. Mapa conceptual de requerimientos de componentes de máquina elíptica. | 30 |
| Figura 17. Bambú, G. Verticillata, D. Asper, G. Angustifolia en el área de almacenaje del proveedor. | 34 |
| Figura 18. Estructura de soporte principal. | 44 |
| Figura 19. Ensemble de soporte principal sin agujeros. | 46 |
| Figura 20. Cubo de acero adjunto a varilla con agujero. | 46 |
| Figura 21. Sistemas de perno tensor intersectados. | 47 |
| Figura 22. Vista lateral de conexión de pernos tensores. | 47 |
| Figura 23. Sistema de manivela. | 48 |
| Figura 24. Proceso de manufactura de eje secundario. | 49 |
| Figura 25. Vista isométrica, frontal y lateral de manivela con solo una platina. | 49 |
| Figura 26. Sistema de manivela y pivote trasero. | 49 |
| Figura 27. Platina para unión de mecanismo de 4 barras. | 50 |
| Figura 28. Eslabón: Biela. | 51 |
| Figura 29. Eslabón: Balancín. | 52 |
| Figura 30. Pivote delantero con eje delantero y pasadores. | 53 |
| Figura 31. Máquina elíptica armada sin soporte de pies y antideslizante. | 54 |
| Figura 32. Junta entre balancín y biela. | 55 |
| Figura 33. Tuerca manteniendo fija la posición de las manivelas. | 56 |
| Figura 34. Junta de balancín-biela. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 35. Sistema manivela, eje y pivote traseros (izquierdo); Vista superior de sistema manivela, eje trasero, pivote trasero (derecha). | 58 |
| Figura 36. Soporte de pies. | 59 |
| Figura 37. Antideslizante debajo de la estructura principal..... | 59 |
| Figura 38. Gráfica de punto medio del pivote delantero, subirse por el lado derecho. | 61 |
| Figura 39. Gráfica de punto medio del pivote delantero, subirse por el lado izquierdo. | 63 |
| Figura 40. Gráfica de punto medio del pivote trasero, subirse por el lado izquierdo. | 64 |
| Figura 41. Gráfica de pivote trasero, peso en pie derecho. | 65 |
| Figura 42. Gráfica de pivote delantero, peso en pie derecho. | 66 |
| Figura 43. Gráfica de pivote trasero, peso en pie izquierdo. | 67 |
| Figura 44. Gráfica de pivote delantero, peso en pie izquierda..... | 68 |
| Figura 45. Análisis de trayectorias. (punto verde: nodo de manivela, punto celeste: nodo de balancín). | 69 |
| Figura 46. Análisis del punto medio en el soporte de pies. | 70 |
| Figura 47. Gráfica de pivote delantero al ser utilizada por el usuario. | 70 |
| Figura 48. Gráfica de pivote trasero al ser utilizada por el usuario. | 70 |
| Figura 49. Aflojamiento de tuerca en junta biela-manivela. (segmento verde, platina de biela/ segmento amarillo manivela). | 71 |
| Figura 50. Falla en unión de boca de pescado de pivote delantero..... | 72 |
| Figura 51. Falla pivote delantero. | 72 |
| Figura 52. Fisuras en balancines- izquierdo y derecho. | 73 |
| Figura 53. Desalineación de bielas. | 74 |
| Figura 54. Ejes axiales de platinas con respecto al eje axial del culmo..... | 74 |
| Figura 55. Eje axial de eje delantero con respecto a eje axial de troco de soporte principal. | 75 |
| Figura 56. Prototipo máquina elíptica de bambú, vista lateral. | 77 |
| Figura 57. Prototipo máquina elíptica de bambú, vista superior. | 77 |
| Figura 59. Vista frontal del pivote trasero. (Eje axial del perno paralelo el eje axial de la base). | 85 |
| Figura 58. Vista frontal del pivote delantero. (Eje axial del perno intercepta el eje axial de la base). | 85 |
| Figura 60. Componentes de perno tensor. | 86 |

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso necesario para seleccionar el material y construir el prototipo de una máquina elíptica construida con bambú como elemento estructural principal. Para ello, se realizó un análisis de las diferentes especies de bambú que existen en el país y sus propiedades físicas y mecánicas. Se definieron los requisitos y criterios para la selección del bambú usando de referencia la Norma E.100 del país de Perú. Con base en el trabajo “Diseño de una máquina elíptica utilizando bambú como material alternativo” realizado por Rodrigo Cabrera se detallaron los componentes de la máquina y la interacción entre ellos; aportado criterios y sugerencias enfocados en el proceso de manufactura para la construcción y pruebas del prototipo. Se adquirieron los materiales necesarios para la construcción y la aplicación de los tratamientos necesarios de acuerdo con la investigación realizada. Para evaluar el diseño final de la máquina elíptica se desarrollaron varias pruebas en las cuáles se verificó el cumplimiento de la mayoría de requisitos, según lo estipulado al diseño. El prototipo final fue capaz de proveer el movimiento elíptico y soportar a un usuario de 60 kg, sin embargo presentó inestabilidad al ser utilizado por el usuario debido a que las uniones propuestas fueron incapaces de proveer la rigidez necesaria presentándose problemas de alineación entre varios componentes.

I.INTRODUCCIÓN

El bambú es una planta que forma parte de la flora natural de Guatemala y existen cerca de 20 especies disponibles (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentación, 2014). Su forma circular y hueca lo hacen un material liviano, fácil de transportar. Las fibras del bambú permiten ser cortadas transversal o longitudinalmente en distintas piezas de diferentes dimensiones. Esta condición ha derivado en utilizarlo como material para construcción, artesanía, tuberías, ropa, pisos, muebles, papel, marcos de bicicleta e inclusive como componente alimenticio. El bambú posee características propias que lo protegen de los distintos factores del medio ambiente como agua e insectos. Dependiendo del uso que se le dará se le es aplicado un método de preservación para alargar su vida útil. El bambú presenta la condición de rápido crecimiento, alcanzando su plenitud de resistencia en un tiempo corto en relación con otras especies maderables utilizadas con los mismos fines. Este puede ser explotado de manera permanente sin destruir las plantaciones, así mismo mitigando la creciente deforestación, siendo un posible sustituto de la madera para construcción.

Debido a la forma de evolución del bambú su estructura es altamente eficaz para resistir cargas de su propio peso y las cargas de momento causado por el impacto lateral del viento (Grosser y Liese, 1971). La explotación del bambú como elemento estructural y auxiliar para construcción ha llevado a investigar acerca de sus propiedades mecánicas. En el país se han realizado estudios para evaluar la propiedad ortotrópica del bambú que determina sus propiedades mecánicas comparando entre diferentes especies. Debido a su origen orgánico las propiedades mecánicas son determinadas por la especie, proceso de cultivo, tratamiento previo y post cosecha. Los estudios a nivel global analizan la incidencia de distintos factores que impactan en la capacidad de soportar distintos esfuerzos como: la ubicación del segmento en el culmo, porcentaje de humedad, porcentaje de fibras, distancia en entrenudos, grosor de pared y edad de la cosecha. Paralelo a las investigaciones sobre las propiedades mecánicas del bambú se han desarrollado métodos para crear uniones donde pueden solo intervenir el bambú u otros materiales como el acero o el plástico. Este desarrollo de uniones a abierto las vías para llevar el bambú a nuevas posibilidades para su uso. El presente documento contiene el proceso de manufactura para la elaboración de un prototipo de una máquina elíptica de bambú utilizando las especies *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantocha Verticillata willdenow*.

II. OBJETIVOS

A. Generales

1. Definir el proceso de manufactura para la fabricación de una máquina elíptica de bambú.
2. Seleccionar el material para construir la estructura de la máquina elíptica.

B. Específicos

1. Identificar las propiedades de los distintos bambús disponibles en Guatemala.
2. Determinar las uniones a emplear entre las diferentes piezas de la máquina.
3. Fabricar los componentes requeridos para la máquina elíptica.
4. Determinar el costo de la máquina elíptica.
5. Realizar un análisis de desempeño del bambú en la máquina elíptica.

III. JUSTIFICACIÓN

La fabricación de una máquina elíptica de bambú constituye es un aporte a la necesidad de disponer de otros usos potenciales para este material con el fin de estimular su uso en Guatemala. El bambú es un elemento que forma parte del ecosistema con características de rápido crecimiento, fácil propagación, captura de bióxido de carbono y una producción de mayor oxígeno en comparación con otras plantas. (Fernández, 2004).

El análisis del material como es el bambú definirá su implementación adecuada en la estructura de la máquina elíptica. El estudio del material proveerá la información necesaria para el criterio de elección de uniones, lo cual es clave para el funcionamiento y seguridad de la máquina elíptica. El proceso de manufactura será el seguimiento del diseño propuesto en “Diseño de una máquina elíptica utilizando bambú como material alternativo”, realizado por Rodrigo Cabrera (UVG. 2020), aplicando todo lo que se recopiló del análisis del material.

IV. MARCO TEÓRICO

El bambú es un miembro de la familia de la grama, la cual incluye cientos de especies alrededor del mundo. Sus diámetros varían al igual que sus respectivas posibilidades de usos. Debido al ambiente en el cual crece naturalmente, evolucionó para ser capaz de resistir las cargas que se producen en el ambiente como viento y gravedad (Richard, 2013). Siendo este material orgánico debe ser tratado y preservado con las debidas medidas para sus respectivos usos posteriores. (Richard, 2013)

A. Taxonomía y clasificación

El bambú pertenece a la familia de la grama *Poaceae* o *Gramineae* donde se divide en subfamilias, tribus, género y especies. (Chapman G. P., 1992) . Se divide en dos tribus; *Olyradae* y *Bambusodae* (Shyun lin Shin. Valdez Cancinos, 2010). *La Bambusodae* se divide en los géneros y especies: *Arundinaria*, *Bambusa*, *Chusquea*, *Dendrocalamus*, *Gigantochloa*, *Guadua*, *Melocanna*, *Merostachys*, *Nastus*, *Phyllostachys*, *Rhipidocladum* y *Schizostachyum* (Chapman G. , 1996)

B. Morfología

Los dos componentes anatómicos principales de la planta de bambú son las cañas visibles del bambú, que se utilizan como materia prima para la construcción y el sistema de rizoma subterráneo. El bambú crece y madura rápidamente, este florece una vez en su toda su vida. En la Figura 1, se observa la composición del bambú y su morfología que está constituida por el rizoma, culmo, yema, hojas, entrenudo, fruto, floración, inflorescencia y nudo del culmo (Calo Rosales, 2018).

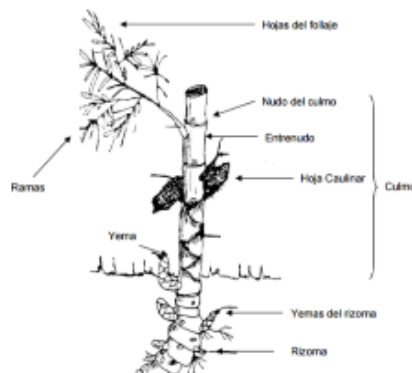


Figura 1. Composición del bambú.

Fuente: Calo Rosales, 2018.

a. Rizoma

El rizoma es la parte de la estructura que soporta la planta, se caracteriza por tener una resistencia definida. Su función es la de almacenar los nutrientes de la planta para su ciclo de vida. Se identifican tres grupos afimorfo, leptomorfo y paquimorfo (Calo Rosales, 2018).

b. Yema

Se encuentra ubicada encima de cada línea que limita un nudo. Las yemas toman importancia, ya que estas son las características utilizadas por la taxonomía para la identificación de las especies, secciones y géneros (Calo Rosales, 2018).

c. Culmo

Porción del bambú que es utilizada para las distintas elaboraciones en construcciones de muebles, papel y artesanías y demás estructuras. Usualmente son utilizados al estar maduros y pasar un tratamiento de secado y de preservación. El culmo es la estructura de soporte del bambú y de transporte de agua (Richard, 2013). La estructura del culmo del bambú está compuesta por diafragmas transversales o nodos que separan las regiones intermodales huecas a lo largo de su altura (Richard, 2013). Dependiendo de la especie, la distancia entre los entrenudos aumenta a lo largo de la altura del culmo, con su consecuente disminución al llegar a la parte superior de la caña (Amada, 1996).

d. Ramas

Las ramas originadas de la línea donde se encuentran los nudos varían en su cantidad dependiendo de la especie de bambú, pudiendo tener de 1 a 100 ramas por nudo (Calo Rosales, 2018). Estas pueden estar constituidas en forma de espigas o abanico e igualmente pueden llegar a tener una rama central dominante (Calo Rosales, 2018).

e. Floración/crecimiento

El bambú es una de las plantas de más rápido crecimiento en la flora y las especies varían en tamaño desde unos pocos centímetros hasta metros de altura. Los bambúes pueden alcanzar su altura máxima de quince a treinta metros en un período de aproximadamente 2 a 4 meses (Liese, 1987). El método de crecimiento primario para el bambú es la reproducción vegetativa (Richard, 2013). En lugar de producir flores y semillas con regularidad, se

producen nuevos cultivos a partir de los entrenudos (leptomorfos) o ápices (paquimorfo) de los rizomas (Richard, 2013). La duración del ciclo de floración varía en cada especie, con un rango de fluctuación entre tres a sesenta años (Calo Rosales, 2018)

C. Composición biológica del bambú

En la Figura 2b, se puede apreciar como las fibras de bambú se distribuyen en mayor densidad en la parte exterior de la pared del culmo y conforme se llega a la región interna disminuye esta densidad. La estructura del bambú está compuesta de celulosa, lingina y hemicelulosa. La lingnina provee rigidez al igual que protege contra ciertos microorganismos que la puedan atacar (Fazita, 2016). La celulosa es una red de cadenas y una red de capas resultando en un comportamiento anisótropo. En la Figura 2, se puede desglosar la macro y microestructura del un culmo de bambú, *Guadua Angustifolia*.

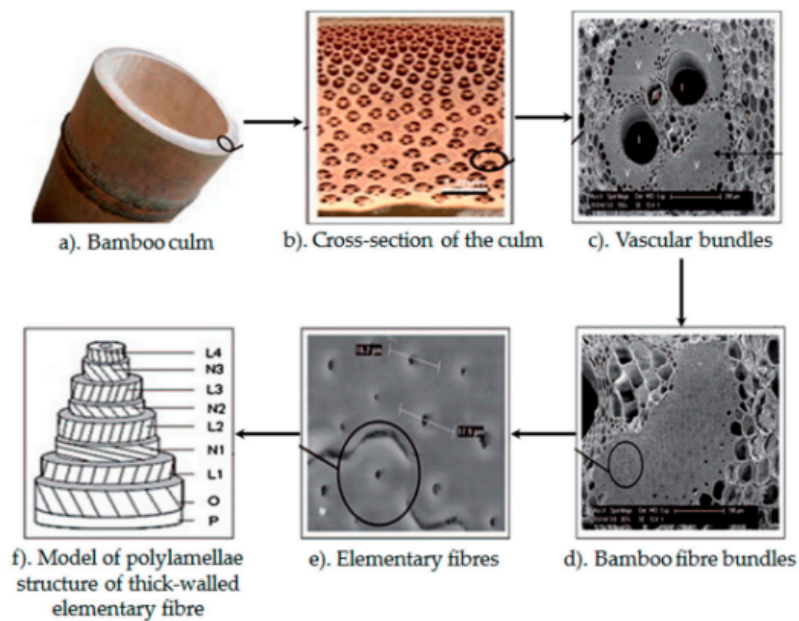


Figura 2. Macroestructura y microestructura del bambú.

Fuente: Osorio, Trujillo, Van Vuure, y Verpoest, 2011.

Las fibras elementales del culmo consisten en una capa gruesa y delgada con diferente orientación con respecto al eje axial de la fibra elemental. La Figura 2f, propuesta por (Liese, 1998) muestra como las capas L1-L4 muestran un ángulo con respecto al eje de la fibra, mientras que las capas de N1 -N3 muestran un comportamiento transversal. Esta estructura no se presenta en las paredes de la madera, la composición conlleva a que presente una resistencia a la tracción extremadamente alta del culmo (Osorio, Trujillo, Van Vuure, &

Verpoest, 2011). Al madurar el culmo, las fibras y los vasos, se endurecen. Las fibras proporcionan la resistencia del culmo, las cuales están agrupadas alrededor de los vasos para transporte de agua y savia (Richard, 2013). Grosser y Liese (1971) indican que debido a la forma de evolución del bambú su estructura es altamente eficaz para resistir la carga de su propio peso y las cargas de momento, causados por la carga adicional del viento lateral cuando lo impacta.

D. Tratamientos y preservación

La durabilidad del bambú dependerá de la especie, la edad, así como de las acciones que se tomen para su preservación (Ghavami, 2008). Un bambú en buenas condiciones de preservación y uso y sin ser tratado previamente, se estima que puede llegar a una duración de 10 a 15 años (Richard, 2013). En un ambiente expuesto en la naturaleza, se estima que el bambú puede llegar a tener una durabilidad de 1-3 años; si no tiene contacto con el suelo puede llegar a una durabilidad entre 4 a 6 años (Janssen, 2008). Los factores identificados que contribuyen en la degradación del bambú son: la infiltración del agua, ataque de bacterias fúngi y el ataque de insectos o roedores (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentación, 2014).

El bambú posee cualidades y características que lo protegen de los distintos factores del medio ambiente como el agua y los insectos. El alto contenido de sílice en la capa exterior previene estos factores al igual que previene la infiltración de los preservantes (Richard, 2013). El aplicarle un tratamiento conlleva a un incremento de su vida útil a 15 años con un contacto en el exterior y en un ambiente interior hasta de 25 años. Entre los preservantes usados para tratamiento del bambú se encuentran los que tienen base de aceites, los solubles en aceite, los solubles en agua y químicos a base de aceite de alquitrán y boro (Jayanetti, 2008). La infiltración de los preservantes puede solo ocurrir en el fin del culmo y los vasos de conducción. Estos vasos se cierran dentro de 24 horas después de ser cosechado; conllevando a que el proceso de tratamiento debe ocurrir poco después de la cosecha y antes del endurecimiento (Janssen, 2008).

Los métodos de preservación varían en tipos de técnicas, así como de la complejidad en cuanto a su aplicación de curado, ahumado, remojo y lavado en cal (Richard, 2013). El método de remojo consiste en sumergir los culmos en agua por 6 semanas, tiempo en el cual el almidón soluble en agua es removido del culmo (Richard, 2013).

Para el tratamiento con fuego, el bambú es lavado con agua y luego, por medio de una antorcha de gas propano es calentado el culmo (Richard, 2013). El culmo empieza a transpirar ácido piroligeno debido al gradiente de temperatura provocada por la llama del gas propano (Richard, 2013).

El tratamiento de verter mezcla de aceite y diésel consiste en perforar el culmo cerca del nudo. En esta perforación se vierte la mezcla de aceite quemado de motor y combustible diésel. Esta mezcla impregna los tejidos blandos del bambú con el fin de actuar como un conservante, aislándolo de la humedad.

E. Disponibilidad del recurso en Guatemala

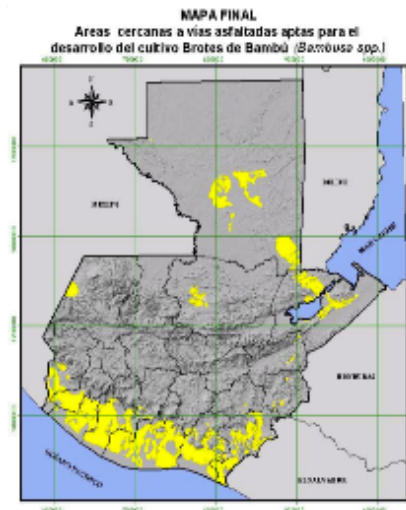


Figura 3. Áreas aptas cercanas a vías asfaltadas para el desarrollo de bambú.

Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentación, 2014.

En Guatemala, según F.A. Mc Clure, se cuenta con 50 especies de bambú distribuidas en 11 géneros de las cuales 16 fueron introducidas al país. “La adaptación del bambú al clima varía según la especie y condiciones meteorológicas en la zona, como altitud, precipitación, temperatura y condiciones del suelo” (Calo Rosales, 2018). “La mayoría de las especies que se encuentran en Guatemala están en los departamentos como San Marcos, Suchitepéquez, Retalhuleu y Escuintla, por supuesto, existen especies en los otros departamentos, pero la presencia es menor” (Calo Rosales, 2018).

F. Antecedentes en Guatemala

En el año 2003 a petición del Gobierno de Guatemala por medio del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), la Misión Técnica de la República de China- Taiwán (MITAC) y el instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA) gestionaron el proyecto: “ *Desarrollo Integral del Cultivo del Bambú y sus Diferentes Usos*”, con el enfoque del mejoramiento del cultivo de bambú para cubrir la demanda existente en ese tiempo en el país, a través del fomento y extensión del cultivo para un seguimiento a las actividades de construcción de viviendas y promover a las industrias de fabricación de muebles y artesanías (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentacion, 2014).

En el año 2009, se construyeron 600 casas de bambú en la aldea El Triunfo, del municipio de Tecún Umán del departamento de San Marcos con la supervisión de la Secretaría de Obras Sociales de la Presidencia, finalizando en 2011, con la entrega de viviendas con dimensiones de 42 metros cuadrados para cada una (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentacion, 2014). El gobierno de Taiwán entregó al ICTA instalaciones y plantaciones de bambú ubicadas en los municipios de Cuyuta y Masagua del departamento de Escuintla. En el mes de noviembre del 2012, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y alimentación indicó que: “*Para darle continuidad a las diferentes actividades se hizo necesario realizar un estudio de factibilidad legal, técnica, económica y financiera del centro educativo de bambú para que el ICTA garantice la sostenibilidad del mismo; con el fin de ampliar las acciones de producción y transformación de bambú realizados anteriormente, se implementará el proyecto “Industrialización del bambú” ayudando de esta manera al gobierno de la República de Guatemala a desarrollar una cadena de valor más completa en la industria del bambú*”.

Actualmente las principales especies cultivadas son *Guadua Angustifolia* / *Bambusa vulgaris* y *Dendrocalamus Asper* / *Guadua angustifolia*. Las especies *Dendrocalamus Asper* y *Guadua angustifolia* son utilizadas con el enfoque de la protección de los cauces de los ríos en la conservación de suelos y aguas (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentacion, 2014). “*Las especies Dendrocalamus Asper, y Guadua angustifolia son mayormente utilizado para construcción de viviendas, contando con 7,000 hectáreas cultivadas*” (Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentacion, 2014).

G. Especies en Guatemala

Tabla 1. Especies de bambú en Guatemala.

| Especies de bambú en Guatemala. | | | | |
|----------------------------------|--|------------------------|----------------------|--|
| Especie | Características | Diámetro del culmo[cm] | Altura del culmo [m] | Usos |
| <i>Guadua Angustifolia</i> | <ul style="list-style-type: none"> Rizoma de tipo paquiformo. Entrenudos miden de 10 a 40 cm. | De 7 a 10. | Alcanza hasta 25 | <ul style="list-style-type: none"> Muy buena calidad Construcción de: muebles artesanías tejidos y papel Brote comestible Raíz y ramas utilizada para artesanías |
| <i>Dendrocalamus asper</i> | <ul style="list-style-type: none"> Paredes del tallo tienen un grosor de 0.5- 1 cm. Entre nudos de 30 a 60 cm. | De 10 a 30. | De 20 a 39. | <ul style="list-style-type: none"> Construcción de viviendas Puentes Conducción de agua Muebles artesanías |
| <i>Gigantochloa Verticillata</i> | <ul style="list-style-type: none"> Grosor de paredes internas de 0.4 a 1 cm. Entrenudos mayores a 60 cm. | De 7 a 12. | De 20 a 25. | <ul style="list-style-type: none"> Apuntalar Artesanías Muebles |
| <i>Dendrocalamus Strictus</i> | <ul style="list-style-type: none"> Distancia entre nudos de 15 a 50 cm. Nudos tienen muchas ramas como paquiformo. | De 3 a 6. | De 6 a 15. | <ul style="list-style-type: none"> Construcción de vivienda Muebles Artesanías prensadas Comestible |

Fuente: Lin, (2010).

H. Estudios previos realizados acerca de las propiedades mecánicas y físicas del bambú

Janssen Julius, 1981 realizó un estudio que se enfoca en proveer información técnica para la aplicación justificada del bambú. El autor define que la razón de las propiedades mecánicas del bambú está altamente relacionada con la composición biológica y química del bambú. Por ejemplo, tamaño de células, geometría, distribución de fibras dentro del culmo y dentro de los nodos, al igual que el espesor de la pared del culmo. En la Tabla 2, se puede ver el resumen de sus conclusiones acerca de la influencia de las distintas propiedades físicas y mecánicas. El autor considera que la tensión no es una limitante de las posibilidades del bambú; por lo cual no la tomó en consideración en sus conclusiones.

Tabla 2. Influencia de propiedades físicas del bambú expuesto a esfuerzos

| Influencia de propiedades físicas del bambú expuesto a esfuerzos. | | | |
|---|---|--|---|
| Influencia en: | Compresión: | Flexión: | Corte: |
| Porcentaje de fibras | Aumenta la capacidad de soportar esfuerzos de compresión | Módulo de Young: Aumenta | Aumenta la capacidad de soportar esfuerzos de corte |
| Contenido de humedad en el culmo Seco = 12% de contenido de humedad Verde = 60-100% de contenido de humedad | Seco soportara más esfuerzos de compresión | Seco soportara más esfuerzos de flexión | Seco soportara más esfuerzos de corte |
| Posición en el culmo. | Parte superior del culmo es más fuerte a esfuerzos de compresión. | Parte superior del culmo es más débil a esfuerzos de flexión, pero más rígido. | Parte superior del culmo es más débil a esfuerzos de corte. |
| Nudo o entrenudo. | No significativo. | Significativo | Entrenudo es más fuerte a esfuerzos de corte. |

Fuente: Janssen J. J (1981).

El autor define en base a sus resultados ciertos criterios a considerar al utilizar bambú:

- El bambú con mayores fibras prevalecerá al pasar tiempo.
- El bambú más pesado (más denso) es preferible para uso de construcciones.

- El bambú debe de estar acondicionado correctamente para que al secarse éste alcance un equilibrio con la humedad relativa del aire. Entre más húmedo sea el clima, peor serán las propiedades mecánicas del bambú.

El elegir qué sección del culmo se utilizará es crítico debido a que el área transversal comienza a disminuir a medida que se va subiendo. A continuación, se presentan diferentes conclusiones a las que llegó el autor acerca del comportamiento del bambú a diferentes esfuerzos:

- Esfuerzo de compresión perpendicular al eje

Hay una diferencia significativa al aplicar el esfuerzo de compresión en un nudo o entre nudos, siendo el entrenudo el más débil. Este resultado es respaldado en los resultados de flexión donde se llega a la misma conclusión. Se recomienda que una fuerza perpendicular al culmo de bambú debería ser posicionada en un nudo; pero esto, usualmente, causa dificultades para administrar que toda junta sea en un nudo. El autor considera la compresión perpendicular al eje una debilidad del bambú.

- Esfuerzo de corte paralelo al eje

El esfuerzo cortante es un problema al trabajar con bambú, esto incluso teniendo un mejor valor de resistencia al corte que la madera. La sección transversal del bambú es vacía, en comparación de la madera que es sólida. La parte interna no contribuye significativamente en el momento de inercia sino al área de corte en la capa neutra; conllevando a que el esfuerzo de corte paralelo al eje sea un punto débil del bambú.

- Esfuerzo de tensión paralelo al eje

El autor confirma que este tipo de esfuerzo no limita las posibilidades del bambú. Las dificultades provienen usualmente en diseñar una conexión del bambú, la cual pueda estar expuestas a altas tensiones con otras partes estructurales. Se cataloga como un punto fuerte la tensión paralela al eje.

- Esfuerzo de compresión paralelo al eje axial

El bambú presenta mejores valores de resistencia a la compresión paralelo a su eje axial en comparación con la madera. La forma hueca de bambú presenta una ventaja para evitar el

fenómeno de pandeo. Poco se abarca en el tema de pandeo en su estudio. Se destaca al final que la resistencia a la compresión paralela al eje axial es un punto fuerte del bambú.

- Flexión

Debido a la forma hueca del bambú es fuerte para soportar cargas de flexión.

- Forma de sección transversal

El autor tuvo inconvenientes al realizar las pruebas, por lo que no pudo llegar a conclusiones al respecto.

Tabla 3. Puntos fuertes y débiles del bambú sometido a esfuerzos.

| Puntos fuertes y débiles del bambú a esfuerzos. | | |
|--|---|---|
| Puntos fuertes | Puntos débiles | Desconocido |
| Tensión paralela al eje axial . | Compresión perpendicular al eje axial . | Corte perpendicular al eje axial. |
| Compresión paralela al eje axial . | Corte paralelo al eje axial. | Tensión perpendicular al eje axial . |
| Flexión. | | Torsión. |
| Forma de área transversal. | | Concentración de esfuerzos alrededor de agujeros. |

Fuente: Janssen J. J. (1981).

Caracterización física y mecánica de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala.

Norma Elizabeth Calo Rosales, 2018 realizó un estudio con el fin de analizar las propiedades físicas y mecánicas de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala. Las tres especies investigadas y analizadas fueron *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantocha Verticillata willdenow*. En las propiedades físicas se determinó el contenido de humedad, contracción, densidad seca, densidad húmeda, dureza, absorción, peso específico y peso específico húmedo. En el área de propiedades mecánicas se realizaron pruebas de ensayo según la norma ISO 22157 (ISO/TC 165 N315), la cual es exclusiva para el bambú. Se realizaron pruebas de resistencia a tensión paralela y perpendicular a la fibra, resistencia a compresión paralela a la fibra sin nudo, con dos nudos, resistencia a corte con y sin nudo y resistencia a flexión.

Las características físicas de la especie *G. Angustifolia* presentaron mayores cambios significativos en sus dimensiones, debido a la disipación del agua durante el proceso de secado, siendo reflejado en los valores de los ensayos de contenido de humedad verde y seco, porcentaje de contracción y absorción.

La especie *D. Asper* registró el mayor valor de peso específico en ambas categorías (verde y seco) y el mayor valor de dureza. Por otro lado, la especie *D. Asper* fue calificada como una especie pesada y las otras dos especies como livianas. Es de tomar en cuenta que ciertas variables varían con la parte del culmo que se trabaje; esto debido a la cantidad de agua que pueda tener el culmo tanto en su crecimiento como en su proceso de secado.

Entre las tres especies analizadas la especie *D. Asper* mostró el mayor valor de módulo de elasticidad de $9.53E4 \text{ kg/cm}^2$. Tiene una baja deformación, y una resistencia de corte de 79.25 kg/cm^2 con nudo. Junto a la *G. Verticillata* tuvieron la mayor resistencia a esfuerzo de compresión con y sin nudo. La *G. Angustifolia* registró la mayor resistencia de tensión perpendicular a la fibra con 0.0088 kg/cm^2 . En la mayoría de los ensayos, la parte apical parte más alta del culmo tiene los mejores resultados debido a que el contenido de humedad decrece en esa parte, confirmando que la resistencia mecánica aumenta conforme la aumenta la altura del culmo.

El estudio recomienda darle un manejo correcto al bambú desde su cultivo hasta su corte, para el cual el bambú debe estar entre los 4 y 6 años. En este período es que adquiere maduración para su uso en construcción. Igualmente, aclara que es necesario el aplicar un tratamiento preventivo después del corte para evitar su deterioro y prolongar su vida útil. El secado del bambú es clave para su uso, ya que al estar en estado verde sus propiedades mecánicas disminuyen debido a su alto contenido de humedad.

M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón, 2008 evaluaron y analizaron el bambú como una alternativa estructural para implementarse en la construcción de viviendas de bajos costos. Evaluaron la capacidad resistiva, definiendo sus propiedades físico-mecánicas como elemento estructural, completando con el análisis de las ventajas y desventajas de la construcción a base de bambú. El proyecto evaluó una única especie, *G. Angustifolia*. Las pruebas fueron realizadas conforme las normas AGIES (Guatemala), enfocadas en efectos de sismo y proponen valores en factores de calidad basándose en aspectos según el material, y de igual manera con base en las normas ASTM (Estados Unidos) para la obtención de las

propiedades físico-mecánicas, determinando la capacidad de compresión, tensión y flexión del bambú.

Para el ensayo de compresión, establecieron el tiempo de madurez, longitud y diámetro de las muestras, igualmente realizaron dos pruebas con y sin nudo para determinar cómo éste afectaba los resultados. Identificaron dos tipos de fallas al estar sometido a compresión; la primera fue el aplastamiento con el plano de ruptura aproximadamente horizontal, y la segunda, por agrietamiento paralelo a la fibra. Las grietas que se presentan se distribuyen inmediatamente en dirección de las fibras y no afectan al punto crítico. Las grietas longitudinales no pueden extenderse a todo su largo debido a los nudos y diafragmas.

Tabla 4. Resultados de ensayo a compresión.

| Resultados de ensayo a compresión. | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| No. Muestra | Tipo | Modulo elástico (kg/cm ²) | Carga máxima a la compresión (kg) |
| 1 | <i>G. Angustifolia</i> Sin nudo | 6.25E4 | 1.20E4 |
| 2 | <i>G. Angustifolia</i> Con nudo | 6.39E4 | 1.24E4 |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

En el ensayo de tensión, se presentaron complicaciones debido que los extremos de las regletas del bambú no son planos y a su vez, se dificultaba ajustarlos de manera correcta. Se concluye que el ensayo no fue exitoso ya que los extremos tendían a soltarse.

Tabla 5. Resultado de ensayo a tensión.

| Resultados de ensayo a tensión. | | | |
|--|---|---------------------------------------|--------------------------------|
| No. Muestra | Tipo | Modulo elástico (kg/cm ²) | Carga máxima a la tensión (kg) |
| 1 | <i>G. Angustifolia</i> sin nudo. | 1.00E5 | 657.70 |
| 2 | <i>G. Angustifolia</i> sin nudo (con cola). | 1.31E5 | 861.82 |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

Tabla 6. Módulo de ruptura en cilindro promedial

| Módulo de ruptura en cilindro. | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|
| | Carga última (kg) | Área (cm ²) | Diámetro exterior (cm) | Momento de inercia (cm ⁴) | Módulo de rotura (kg/cm ²) |
| Muestra promedio cilindro con nudo. | 294.83 | 15.00 | 9.10 | 20.73 | 485.26 |
| Muestra promedio cilindro sin nudo. | 257.79 | 15.00 | 9.10 | 18.01 | 488.42 |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

En la Tabla 7, se muestra el valor de esfuerzo cortante del bambú y este valor se encuentran dentro del intervalo de los valores correspondientes a la madera que es de 13.60 a 20.41 kg/cm². Los autores mencionan que el bambú no resiste de la forma esperada debido a que tiende a rajarse paralelo a las fibras.

Tabla 7. Esfuerzo cortante

| Esfuerzo cortante | |
|--------------------------|---|
| Tipo | Esfuerzo cortante (kg/cm ²) |
| <i>Guadua</i> sin nudo. | 16.52 |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

Tabla 8. Ventajas y desventajas del uso del bambú como materia para construcción.

| Ventajas y desventajas del uso de bambú como materia de construcción. | |
|---|--|
| Ventajas | Desventajas |
| <p>-Su forma circular y su sección hueca lo hacen un material liviano, fácil de transportar y de almacenar.</p> <p>-En cada nudo del bambú hay un tabique o pared transversal que además de hacerlo más rígido y elástico evita su ruptura al curvarse.</p> | <p>- Un contacto con la humedad del suelo presenta pudrición y aumenta el ataque de insectos.</p> <p>- Una vez cortado debe ser tratado.</p> <p>- Al envejecer el bambú pierde su resistencia si no se trata apropiadamente</p> <p>- Al secarse se contrae y reduce su diámetro.</p> |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

| Continuación de ventajas y desventajas del uso de bambú como materia de construcción. | |
|---|---|
| Ventajas | Desventajas |
| <p>-Las fibras permiten ser cortadas transversal o longitudinalmente en piezas de cualquier longitud, empleando herramientas manuales.</p> <p>-La superficie natural del bambú es lisa, limpia de color atractivo y no requiere ser pintada raspada o pulida.</p> | <p>- La pared por lo que algunas veces presentan dificultades en la construcción</p> <p>- No tiene diámetro constante en toda su longitud, tampoco es constante el espesor de la pared por lo que algunas veces presentan dificultades en la construcción.</p> <p>- Al secarse se contrae y reduce su diámetro.</p> |

Fuente: M Aguilar. Delgado, Luis F. Girón y otros (2008).

I. Uniones

Como se indicó previamente, el bambú es utilizado como componente estructural. Hay diversas maneras para crear uniones entre los culmos de bambú. Las uniones deben ser capaces de resistir tensiones y momentos flectores, que se caracteriza por restringir el grado de libertad rotacional. Las uniones van de la mano con el propósito que se le quiera dar a la estructura. A continuación, se presentan distintas uniones utilizadas en el bambú:

1. Boca de pescado

Este tipo de unión presenta una forma de boca de pescado en las extremidades del culmo. La boca de pescado reposa sobre otro culmo de bambú. La función de esta unión es crear una unión de forma perpendicular. Para tener una unión más fija se puede moldear el culmo, para que tenga un segmento corto que sirva como macho y hembra para la unión de las piezas. (Ubidia, 2015)



Figura 4. Unión de boca de pescado.

Fuente: Ubidia 2015.

2. Perno Pasante

Para fijar y asegurar uniones de bambú y otros materiales, en muchos casos se utilizan elementos pasantes. Dependiendo del material disponible y el presupuesto, se puede usar pernos de acero galvanizado con varillas roscadas, tuercas y arandelas, o tacos de madera dura, o varillas de acero lisas. (Ubidia, 2015)



Figura 5. Perno pasante, fijando 2 o más culmos.

Fuente: Ubidia 2015.

3. Perno Tensor

Este tipo de unión es aplicable solo para uniones tipo boca de pescado. Requiere dos piezas de acero: una varilla roscada o con hilo en un extremo y gancho en el otro (varilla tensora) y un perno de menor longitud (anclaje). La varilla tensora, ubicada en la caña que no tiene boca de pescado, penetra en la otra caña y se engancha en el perno de anclaje. La ventaja de esta unión es que se puede asegurar apretando la tuerca y queda discreta. (Ubidia, 2015)



Figura 6. Instalación de perno tensor.

Fuente: Ubidia 2015

4. Unión Longitudinal

Para unir dos cañas longitudinalmente, se seleccionan bambúes de similar diámetro. Se realiza el corte de tal manera que la unión a realizar presente dos nudos cercanos (menos de 6 cm. de la extremidad.) (Ubidia, 2015)



Figura 7. Unión longitudinal.

Fuente: Ubidia 2015.

5. Relleno de mortero

En la Figura 8, se puede observar el agujero para la introducción de una mezcla de cemento y arena (mortero). Se procede al relleno de los culmos de bambú para reforzar las uniones. Esta técnica sirve para fijar las uniones con pernos o fierros empotrados, evitar el aplastamiento y aumentar la resistencia del bambú al corte. En particular, se aplica para unir columnas de bambú a los cimientos, en los cuales previamente se ha empotrado una varilla de acero. (Ubidia, 2015)



Figura 8. Relleno de mortero.

Fuente: Ubidia 2015.

6. Unión perpendicular con amarre

El amarre puede ser de cuerda, cincho metálico o plástico. Es importante asegurarse de la correcta tensión del amarre y revisarlo periódicamente, después de la construcción. (Ubidia, 2015)



Figura 9. Unión perpendicular con amarre.

Fuente: Ubidia 2015.

J. Tipo de fallas

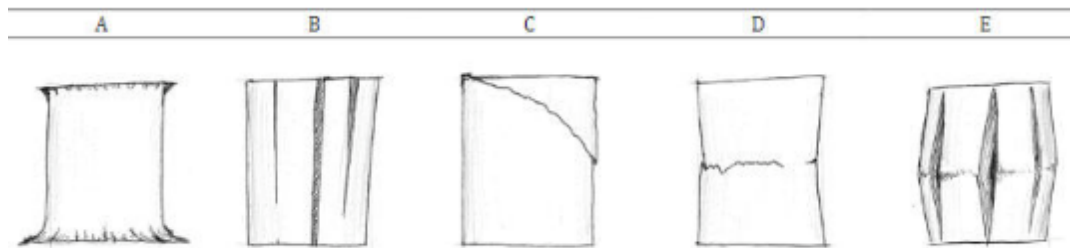


Figura 10. A) Falla por aplastamiento, b) Falla por tensión de las fibras, c) Falla por corte, d) Falla por pandeo general de las fibras en direcciones), e) Falla por pandeo general de las fibras en dirección externa.

Fuente: Jaramillo, 2016.

1. Falla por aplastamiento

La sección transversal falla debido a concentraciones de carga. En la Figura 10 a), se muestra cómo se produce la falla de este tipo en el bambú al ser sometido por una fuerza de compresión. En las pruebas realizadas, se indica que esto se debe a que se pandean las fibras del exterior en las zonas de contacto. (Jaramillo, 2016)

2. Falla por tensión en las fibras

Al estar sometido a fuerzas de compresión, las tensiones tangenciales separan las fibras entre sí (Jaramillo, 2016), provocando que se forme una rajadura en el culmo. En la Figura 10 b), se muestra este tipo de falla.

3. Falla por corte

Al ser sometido a compresión las fibras fallan debido a la propagación de tensiones diagonales, provocando una falla como la mostrada en la Figura 10c. (Jaramillo, 2016).

4. Falla por pandeo general de las fibras en dirección interna/externa

Este tipo de falla puede ser una continuación de una falla por tensión de las fibras conllevando a que las fibras se pandean en dirección externa al culmo. (Jaramillo, 2016). (Esta falla se puede observar en las Figuras 10 d y e).

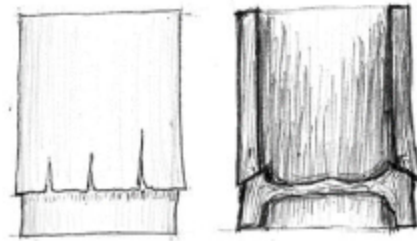


Figura 11. Falla por pandeo local de las fibras en presencia de nudo.

Fuente: Jaramillo, 2016.

5. Falla por pandeo local de las fibras en presencia de nudo

Al someter el culmo en compresión con un nudo, la falla ocurre en las cercanías del nudo, debido a la desviación de los esfuerzos de compresión que siguen la dirección de las fibras. Se puede observar en la Figura 11, como se presenta esta falla.

K. Norma E 100

La norma técnica del Ministerio de Perú E.100 para la selección del bambú, elaborada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, fue la que se tomó como base para la selección del bambú en este proyecto. Esta norma está propuesta para fines estructurales en la construcción de viviendas y solo aplica para *Guadua Angustifolia* al ser utilizado como elemento estructural. La Guía de la Norma E.100 define las siguientes características como los criterios para la selección de el bambú:

- La edad de la cosecha debe de estar dentro 4 a 6 años.
- Se debe tomar en cuenta todas las precauciones para garantizar que las piezas al secarse tengan el dimensionamiento previsto en el diseño.

- Las piezas no pueden presentar una deformación inicial del eje al 0.33 % de la longitud del elemento.
- Las piezas no presentan fisuras perimetrales en los nudos ni fisuras longitudinales a lo largo del eje neutro del elemento. En caso de tener fisuras estas deben estar ubicadas en la fibra externa superior o en la fibra externa inferior.
- Las piezas de bambú estructural no deben presentar perforaciones causadas por ataque de insectos antes de ser usadas.
- No aceptar bambús que presenten grado de pudrición.

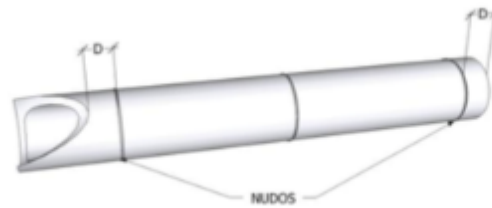


Figura 12. Separación de nudo y unión de bambú.

Fuente: Norma E.100.

1. Uniones entre piezas

Las piezas de bambú deben ser cortadas de tal forma que quede un nudo entero en cada extremo o próximo a él, a una distancia máxima de 6 cm del nudo. Las piezas de bambú no se deben unir con clavos.

2. Uniones con tarugos o pernos

- Los pernos pueden ser fabricados de varillas roscadas o con barras comerciales de rosca.
- La perforación del entrenudo para el perno debe pasar por el eje central del bambú.

3. Uniones perpendiculares y en diagonal

- Se debe lograr el mayor contacto entre las piezas.
- Se debe asegurar la rigidez de la unión utilizando refuerzos como con uniones con tarugos o perno y/o con unión con mortero.

4. Mantenimiento

- Piezas de bambú en exteriores. Se debe hacer mantenimiento como mínimo cada 6 meses.

- Piezas de bambú en exteriores protegidas de la intemperie. Se debe realizar el mantenimiento como mínimo cada año.
- Se debe desechar si se encuentran roturas, deformaciones excesivas o ataques de insectos en piezas estructurales.
- Revisar la unión periódicamente, para reemplazar en caso de aflojamiento.

L. Mecanismos y estructuras

Un mecanismo se define como el conjunto de eslabones que presentan un valor positivo de grados libertad. La estructura es un conjunto de eslabones que presentan 0 grados de libertad o estructuras precargadas con valor negativo de grados de libertad.

1. Juntas

Una junta es la conexión entre dos o más eslabones (en sus nodos), permitiendo el movimiento o movimiento potencia entre los eslabones conectados (Norton, 2009). Hay distintas clasificaciones: por el tipo de contacto entre los elementos, número de grado de libertad, tipo de cierre físico y por número de eslabones. Para este proyecto se emplearán en eslabones binarios utilizando juntas revolutas permitiendo un grado de libertad.

i. Juntas de voladizo o doble voladizo

La junta de voladizo simple o doble es una unión de dos eslabones que sirve para dar apoyo a las cargas y movimientos entre estos. Se recomienda utilizar el doble voladizo siempre que sea posible, ya que este dará un soporte más fuerte a la unión de los eslabones. La junta de voladizo se caracteriza porque el pasador está solo soportado como en una viga en voladizo, mientras que la de doble voladizo se encuentra con una carga cortante doble, donde dos secciones transversales comparten la carga.

V. METODOLOGÍA

Inicialmente se establecieron los requisitos y criterios para la selección de las especies de bambú a utilizar, basados en Norma E 100 del país de Perú. Además, se planteó emplear las especies: *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantocha Verticillata willdenow* para la construcción del prototipo, considerando su capacidad para cumplir con los requisitos establecidos y su disponibilidad en Guatemala. Así mismo, se desarrollaron los conceptos operacionales de la máquina elíptica para comprender su funcionamiento e interacción con el usuario y se procedió a la elaboración del diseño y establecimiento de los parámetros para evaluar el prototipo final de la máquina. Posteriormente, al tener el diseño definido, se realizaron los análisis de materiales, herramientas e instrumentos necesarios para el proceso de manufactura y se ejecutaron una serie de pruebas de corte, perforaciones y uniones entre culmos de bambú con el propósito de determinar el proceso más adecuado de manufactura. También, se realizaron revisiones de la movilidad del prototipo, con sus respectivos ajustes. Concluyendo en una prueba para evaluar el cumplimiento de los requisitos del prototipo. A continuación la descripción de los pasos metodológicos ejecutados.

A. Definición de requisitos

Para la selección de un bambú adecuado al proyecto, se establecieron los requisitos necesarios que este debía cumplir (Tabla 9).

Tabla 9. Requisitos para selección y mantenimiento de bambú.

| Requisitos para selección/mantenimiento de bambú | |
|---|--|
| A | La edad de los culmos debe estar en un rango de 4 a 6 años. |
| B | Piezas no deben presentar una deformación inicial del eje. Las piezas no deben presentar fisuras perimetrales en los nudos ni fisuras longitudinales lo largo del eje neutro. |
| C | longitudinales lo largo del eje neutro. |
| D | No deben haber perforaciones de insectos en el bambú. |
| E | No debe haber signos de pudrición. |
| F | Debe tener tratamiento encontrar de insectos. |
| G | Los culmos no deben exponerse al sol directo al estar almacenados. |
| H | Al secarse deben tener las dimensiones prevista en el diseño (6.5 cm – 8 cm). |

Fuente: Elaboración propia.

B. Conceptos operacionales

Basado en el diseño preliminar de la máquina elíptica, descrito en el proyecto “Diseño de una máquina elíptica utilizando bambú como material alternativo”, realizado por Rodrigo Cabrera (UVG. 2020), se formularon los conceptos operacionales (Tabla 10) planteando paso a paso la interacción del usuario y la máquina.

Tabla 10. Conceptos operacionales.

| Conceptos operacionales. |
|--|
| 1.El usuario se coloca a un lado de la máquina. |
| 2.El usuario se agarra de los dos balancines de la máquina. |
| 3.Posteriormente, el usuario sube un pie colocándolo en el soporte de pies sobre la biela, seguido por el otro pie. |
| 4.El usuario se acomoda para iniciar el movimiento elíptico. |
| 5.El usuario mueve la biela izquierda hacia adelante con su brazo izquierdo, simultáneamente la biela derecha retrocede con su brazo derecho. |
| 6.Al mismo tiempo de realizar el movimiento de balancín, el pie izquierdo se desplaza para atrás mientras el pie derecho se desplaza para el frente (balancín izquierdo – pie izquierdo) (balancín derecho – pie derecho). |
| 7.El usuario empieza a repetir los movimientos 5 y 6, variando las revoluciones de sus ciclos a medida que empieza a realizar el ejercicio. |
| 8.El usuario baja las revoluciones, hasta detener por completo el movimiento de sus brazos y pies, y en consecuencia, el de la máquina elíptica. |
| 9.El usuario se aferra a las bielas de la máquina, seguido por la acción de bajar un pie. |
| 10.Después, el usuario baja el otro pie y consecuentemente, se suelta de los balancines de la máquina. |

Fuente: Elaboración propia.

C. Selección de especies de bambú

De las especies de bambú disponible en Guatemala, se decidió por las especies: *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantocha Verticillata willdenow* que son utilizadas en construcción de viviendas y uso artesanal.

Se contactaron 2 proveedores de bambú: Ecobambú y Arquitlán. Ecobambú, tiene su plantación en el departamento de Suchitepéquez, mientras que Arquitlán está ubicado en el municipio de Panajachel del departamento de Sololá. Ambos proveedores están enfocados en la cosecha de bambú para uso estructural en construcción de casas. Estos proveedores ofrecen las especies *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantocha Verticillata willdenow*. Se decidió trabajar con Ecobambú debido a la disponibilidad de transporte del producto.

D. Diseño preliminar

El diseño preliminar consistía en una estructura y un mecanismo tal y como se observa en la Figura 13.

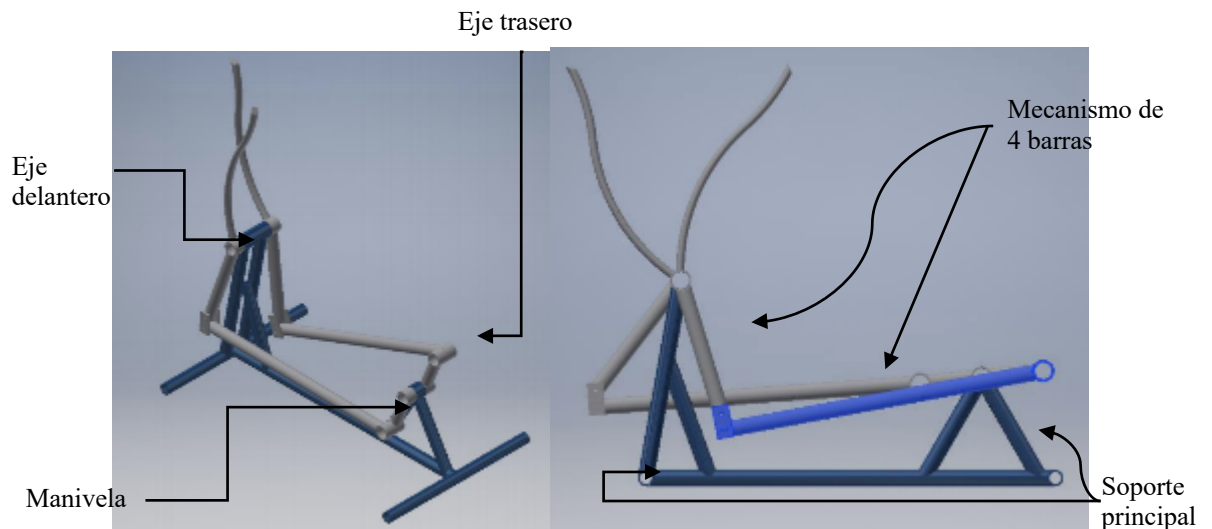


Figura 13. Vista isométrica de máquina elíptica diseño preliminar (Izquierda); Vista lateral de máquina elíptica diseño preliminar (Derecha).

Fuente: Elaboración propia.

La máquina está conformada por los siguientes componentes: soporte principal (partes en color azul en la Figura 13), mecanismo de 4 barras (partes en color gris), eje delantero y eje trasero. El soporte principal y el mecanismo de 4 barras están conectados por el eje delantero y eje trasero. El mecanismo de 4 barras involucra un total de 8 juntas, y la estructura del soporte principal consiste en 7 uniones. Para la estructura principal se planteó usar la unión de boca de pescado entre culmos de bambú, tal como se muestra en la Figura 14. El diseño preliminar del soporte principal consiste en 7 uniones de bocas de pescado. Se decidió minimizar las piezas de 45 grados conllevando a tener en solo dos culmos como pivotes para

los ejes, y una pieza de en 45 grados para el pivote delantero (4 uniones). Para mantener unido el soporte principal se decidió utilizar el sistema perno tensor, debido al ajuste fino para aplicar la precarga.

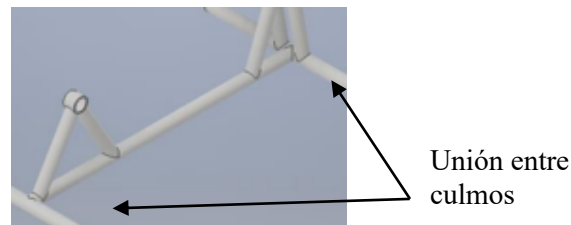


Figura 14. Estructura principal (soporte principal).

Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Culmo + platina (eslabón).

Fuente: Elaboración propia..

Se determinó que las juntas del mecanismo de 4 barras serían construidas por medio de platinas de acero negro, que saldrían de las extremidades del culmo de bambú. Con el objetivo que éstas funcionaran como los nodos de los eslabones, como se muestra en la Figura 15. Estas platinas tienen un agujero para poder conectar los distintos eslabones y las platinas están sujetas al culmo de bambú por medio de un pasador, el cual estará fijo y apretado por una tuerca. Los culmos del mecanismo de 4 barras tendrán dos puntos de concertación de esfuerzos: en los agujeros de los pasadores para las platinas y en el punto de contacto del filo de la platina con la cara interior del culmo. Se obtendrá una combinación de esfuerzos cortantes y de aplastamiento en el interior del culmo en el área de contacto del pasador con el culmo. Esto se tomara en cuenta al decidir la especie a utilizar.

En el diseño preliminar, se tiene contemplado que el sistema de eje trasero y manivela tengan una posición fija, con fin de obtener la revolución de la manivela. Por lo tanto, se planteó que para fijar la posición del eje trasero por medio de una contratuerca.

E. Selección de especie de bambú para cada pieza.

Tabla 11. Esfuerzos presentes en las piezas del soporte principal

| Esfuerzos presentes en las piezas del soporte principal | |
|---|---|
| Pieza | Esfuerzos presentes |
| Soportes laterales | Esfuerzo normal radial |
| Pivote delantero / Pivote trasero | Esfuerzo normal longitudinal Flexión Torsión Aplastamiento axial |
| Soporte de 45 grados | Esfuerzo normal longitudinales Flexión |
| Tronco | Esfuerzo normal radial y longitudinales |

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los esfuerzos presentes en las piezas del soporte principal, Tabla 11. Los esfuerzos normales longitudinales y radiales son los que están presentes en todas las piezas. Las especies *Dendrocalamus Asper* o *Guadua Angustifolia* se consideran las indicadas para este tipo de esfuerzos debido a su uso como elementos estructurales de viviendas las cuales están sometidos a ese tipo de esfuerzos. Ambas especies presentan una menor distancia entre nudos, permitiendo que las cargas se distribuyan en los nudos del culmo evitando fallas por aplastamiento radial y longitudinal al eje. Ambas especies presentan una mayor densidad favoreciendo que la estructura tenga un mayor peso dificultando su desplazamiento al ser utilizado.

Tabla 12. Esfuerzos presentes en las piezas del mecanismo de 4 barras.

| Esfuerzos presentes en las piezas del mecanismo de 4 barras | |
|---|--|
| Pieza | Esfuerzos presentes |
| Biela | Flexión Torsión Esfuerzo normal radial Esfuerzo cortante longitudinal |

Fuente: Elaboración propia

| Continuación de esfuerzos presentes en las piezas del mecanismo de 4 barras | |
|---|--|
| Pieza | Esfuerzos presentes |
| Manivela | Flexión Torque Esfuerzo normal longitudinal |
| Balancín | Flexión Esfuerzo normal longitudinal y radial Esfuerzo cortante longitudinal |

Fuente: Elaboración propia

El balancín presenta un movimiento teórico oscilatorio donde estará sometidos a esfuerzos normales longitudinales y de flexión. El balancín no debe de agregar una gran cantidad de peso ya que dificultara la movilidad del mecanismo y este debe poder ser agarrado por el usuario. Debido a las propiedades físicas necesarias para esta pieza se elaborara con la especie *G. Verticillata*, debido a su menor densidad y menor diámetro.

El centro de masa de la biela realizara un desplazamiento elíptico, siendo sometido a esfuerzos de flexión, torsión y esfuerzos normales radiales. Debido a ser una pieza que estará en contacto con el peso del usuario, se determina que se utilizará la especie *Dendrocalamus Asper* o *Guadua Angustifolia* debido a que tienen el mayor espesor de pared y la menor distancia entrenudos. La menor distancia entrenudos favorecerá a un mayor soporte en los puntos de aplicación de cargas. El espesor de pared aumentará el momento de inercia del culmo disminuyendo la magnitud del esfuerzo en el culmo.

La manivela estará expuesta a esfuerzos de torque, flexión y esfuerzo normal longitudinales. La manivela siendo la más pequeña en comparación con los otros eslabones, se identifica la dificultad de manufacturarla de bambú pues la distancia entrenudos del culmo no permitirían cumplir con las dimensiones definidas por el diseño. Se considera que la manivela no debe de deformarse y debe soportar los esfuerzos de fatiga al realizar sus respectivas revoluciones. Se decidió que la manivela no fuera de bambú por la dimensión de la pieza y que fuera de acero negro debido a la necesidad de la pieza para no deformarse al estar sometido a esfuerzos y poder soportar la fatiga de estar realizando revoluciones.

A continuación, se establecen los requerimientos de los 3 componentes principales de la máquina elíptica:

1. Soporte principal
2. Ejes
3. Mecanismo de 4 barras

Los requerimientos se definieron basándose en el movimiento esperado del mecanismo de 4 barras, a la interacción entre componentes y el manejo del bambú. En la Figura 16, se muestra cómo se interconectan los componentes y sus piezas. La Tabla 13, se detalla los requerimientos del soporte principal, la Tabla 14 muestra los requerimientos para los ejes y finalmente, la Tabla 15 describe los requerimientos del mecanismo de 4 barras.

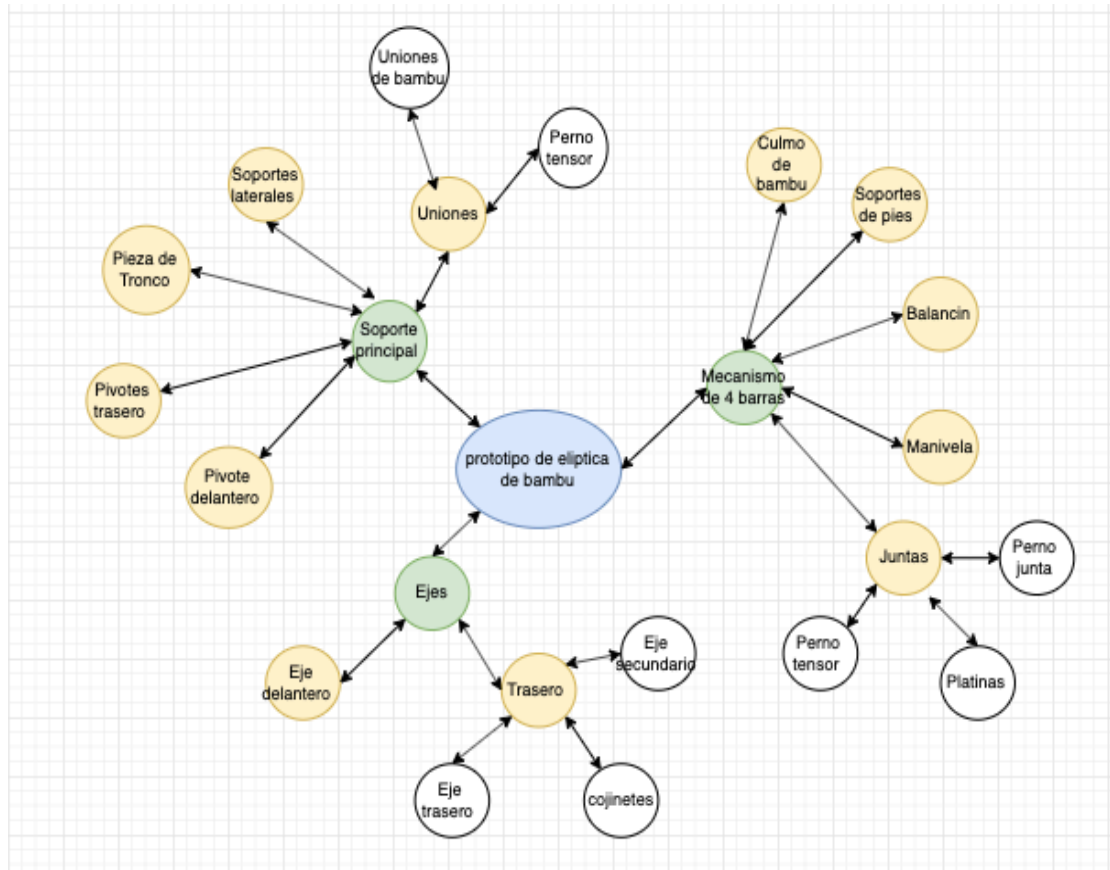


Figura 16. Mapa conceptual de requerimientos de componentes de máquina elíptica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Requerimientos del soporte principal

| Requerimientos del soporte principal. | |
|--|---|
| 1.0.0 | Soporte principal |
| 1.0.0.a | La máquina no debe de estar en contacto con el suelo. |
| 1.0.0.b | La estructura no se debe desplazar de su posición. |
| 1.1.0 | Base de soporte principal pieza de bambú |
| 1.1.0.a | Los agujeros en serie tienen que estar separados por un nudo. |
| 1.1.0.b | El eje axial de los agujeros de los pivotes debe estar a 90° con el eje axial de los pernos tensores. |
| 1.1.0.c | Los ejes axiales de los agujeros de los pernos tensores y los ejes axiales de los pivotes tienen que estar a 90 grados. |
| 1.2.0 | Pivote delantero |
| 1.2.0.a | El agujero para el eje delantero debe estar a 90° con respecto al eje axial del culmo. |
| 1.2.0.b | El nudo debe estar a un rango 6.00 cm de la boca de pescado. |
| 1.2.0.c | Los pernos deben estar a una distancia de 6.00 cm de un nudo. |
| 1.2.1 | Pivote trasero |
| 1.2.1.a | El agujero para el eje trasero tiene que estar a 90° con respecto al eje axial del culmo. |
| 1.3.0 | Soportes laterales |
| 1.3.0.a | El eje axial del culmo debe estar a 90° del eje axial de la varilla roscada . |
| 1.4.0 | Uniones para estructura de soporte principal |
| 1.4.0.a | Las uniones deben mantener su posición fija, al ser utilizado la máquina. |
| 1.4.0.b | Se debe poder desmantelamiento las uniones |
| 1.4.1 | Unión de bambú / bocas de pescado |
| 1.4.1.a | La unión de culmos de bambú debe de estar de forma perpendicular. |
| 1.4.1.b | La boca de pescado debe estar a un rango de 6.00 cm del un nudo. |
| 1.4.1.c | El agujero de perno debe estar a un rango de 6.00 cm del un nudo. |
| 1.4.2 | Perno tensor / Unión para ajuste |
| 1.4.2.a | Unión de boca de pescado debe estar en posición de diseño. |
| 1.4.2.b | Se debe restringir el desplazamiento de la boca de pescado. |
| 1.4.2.c | Se debe poder realizar un ajuste fino a la precarga. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Requerimientos de ejes.

| Requerimientos de ejes. | |
|--------------------------------|--|
| 2.0.0 | Ejes |
| 2.0.0.a | El eje no debe desplazarse . |
| 2.1.0 | Eje delantero |
| 2.1.0.a | El eje axial debe estar perpendicular respecto al eje axial del culmo del pivote delantero |
| 2.1.0.b | Se debe poder desmantelar el eje. |
| 2.1.0.c | Los pasadores deben restringen el desplazamiento del eje. |
| 2.2.0 | Eje trasero |
| 2.2.0.a | El eje axial del eje trasero debe de estar perpendicular respecto al eje axial del culmo . |
| 2.2.0.b | Se debe poder desmantelar el sistema del eje trasero. |

Fuente: Elaboración propia.

| Continuación Requerimientos de ejes. | |
|---|--|
| 2.2.1 | Eje trasero |
| 2.2.1.a | Debe haber igualdad entre el diámetro del eje trasero y el diámetro del nodo de la platina de la manivela . |
| 2.2.1.b | Se debe poder desarmar el eje trasero . |
| 2.2.1.c | El eje trasero debe de rotar libremente. |
| 2.2.2 | Eje secundario |
| 2.2.2.a | Dimensiones deben coincidir con los cojinetes y el eje trasero. |
| 2.2.2.b | Debe haber un ajuste de interferencia del eje con el agujero del pivote trasero. |
| 2.2.2.c | El eje debe de estar fijo. |
| 2.2.2.d | Se debe poder desmantelar el eje secundario. |
| 2.2.3 | Cojinetes |
| 2.2.3.a | Las dimensiones de diámetro exterior y diámetro interior deben coincidir con las dimensiones del eje secundario. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Requerimientos de mecanismo de 4 barras.

| Requerimientos de mecanismo de 4 barras. | |
|---|---|
| 3.0.0 | Mecanismo de 4 barras |
| 3.0.0.a | El prototipo debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del mecanismo de 4 barras de diseño. |
| 3.0.0.b | La dimensión de la bancada debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del diseño de plano. |
| 3.1.0 | Juntas |
| 3.1.0.a | Las juntas entre el eslabón de biela y balancines deben ser doble voladizo. |
| 3.1.0.b | Las juntas entre el eslabón biela y manivela deben ser voladizo. |
| 3.1.0.c | Se debe poder desmantelar juntas. |
| 3.1.1 | Platinas |
| 3.1.1.a | La platina debe extender el culmo (culmo+platina=eslabón). |
| 3.1.1.b | Las platinas proveen el agujero para ser el nodo del eslabón. |
| 3.1.2 | Perno tensor |
| 3.1.2.a | Debe evitar desplazamiento de la platina. |
| 3.1.2.b | El perno tensor debe coincidir con la dimensión del agujero de la platina. |
| 3.1.2.c | Se debe poder desmantelar mecanismo de 4 barras. |
| 3.2.0 | Biela |
| 3.2.0.a | Eslabón (culmo+platina) debe estar en una tolerancia de +/-2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras. |
| 3.2.0.b | Los centros de los agujeros de las platinas y eje axial del culmo deben ser colineales. |
| 3.2.0.c | El agujero para el perno tiene que estar en un rango de 6.00 cm de un nudo. |
| 3.2.0.d | Agujeros en serie deben estar separados por 1 nudo. |
| 3.2.0.e | El grosor de la platina debe ser colineal con el eje axial del culmo. |
| 3.2.0.f | El diámetro interior del culmo debe permitir que la platina entre dentro del culmo. |
| 3.2.0.g | Un nudo debe estar en medio del culmo. |

Fuente: Elaboración propia.

| Continuación de requerimientos de mecanismo de 4 barras. | |
|---|---|
| 3.2.2 | Soporte de pies |
| 3.2.2.a | Debe haber tener un antideslizante en los soportes de los pies. Los soportes de los pies deben mantenerse en posición fija al utilizarse la máquina. |
| 3.2.2.b | |
| 3.3.0 | Manivela |
| 3.3.0.a | El nodo compartido con biela debe girar 360° con respecto al eje trasero. |
| 3.3.0.b | Las manivelas tienen que mantener un ángulo de 180° entre ellas. |
| 3.3.0.c | La manivela debe permitir desmantelarse. El eslabón debe estar en una tolerancia de +/-2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras de diseño. |
| 3.3.0.d | |
| 3.4.0 | Balancín |
| 3.4.0.a | La junta con biela debe de dar un movimiento oscilatorio al ser utilizada la máquina. |
| 3.4.0.b | El perno y el eje delantero deben estar colineales al eje axial del culmo. El eslabón (culmo+platina) tienen estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras. |
| 3.4.0.c | |
| 3.4.0.d | Tiene que haber una diferencia entre par de eslabones de 3.00 +/- cm. |

Fuente: Elaboración propia.

F. Lista de materiales para construcción del prototipo

Se adquirieron 10 metros lineales de las especies *G. Angustifolia*, *G. Verticillata* y *D. Asper* para un total de 12 culmos de 10.16 cm (4 pulgadas) de diámetro. Se espera que, al contraerse el bambú, debido al proceso de secado, los diámetros se mantengan en un rango de 6.5 cm. a 8 cm. El proveedor registra y certifica que la edad de los culmos es de 4 años en las 3 especies. A continuación, la Tabla 16 y 17 desglosa los materiales y herramientas que fueron utilizadas en la manufactura de la máquina elíptica

Tabla 16. Lista de materiales que componen el prototipo.

| Lista de materiales. | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Material | Cantidad | Especificaciones |
| Bambú <i>D. Asper</i> | 4 culmos | 3.3 metros |
| Bambú <i>G. Verticillata</i> | 4 culmos | 3.3 metros |
| Bambú <i>G. Angustifolia</i> | 4 culmos | 3.3 metros |
| Cilindro de acero de 1 pulgada | 1 | Longitud 4 pulgadas |
| Cilindro sólido de acero | 1 | Longitud 2 pies |
| Lija | 2 | Grado 60 |
| Tornillos de ½ pulgada | 2 | Longitud: 3 ½ pulgadas |
| Tornillo de ½ pulgada | 8 | Longitud 4 pulgadas |
| Tornillo de ½ pulgada | 2 | Longitud 1 ½ pulgadas |

Fuente: Elaboración propia.

| Continuación de lista de materiales. | | |
|---|-----------------|---|
| Material | Cantidad | Especificaciones |
| Tuerca | 20 | Diámetro interior de ½ pulgada |
| Formón de 1 pulgada | 1 | |
| Varilla roscada | 2 | Diámetro de ½ pulgadas |
| Abrazadera | 4 | |
| Rodamientos de bolas | 2 | Diámetro interior 12 mm, Diámetro externo de 22 mm. |
| Arandela | 24 | Diámetro interior ½ pulgada |
| Pegamento de contacto | 1 | |
| Alfombra antideslizante | 1 | |
| Tubo de 1 pulg aluminio 1440 | 1 | Longitud: 1 metro |
| Tornillos | 6 | Diámetro ¼ pulgada |
| Lámina de acero | 1 | 3 x 3 pies, 1/8 de grosor |
| Tuerca | 6 | Rosca de ¼ pulgada |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Herramientas y maquinaria utilizada para la manufactura del prototipo.

| Herramientas y maquinaria utilizada para la manufactura del prototipo. | |
|---|--------------------------|
| Herramienta o maquinaria | Descripción |
| Torno | |
| Cortadora por aire comprimido | |
| Soldadora | |
| Sierra de mano | |
| Formón | ½ pulgada y de ¼ pulgada |
| Dobladora | |
| Terraja de roscar/ mocho de roscar | |
| Lima | |

Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Bambú, G. Verticillata, D. Asper, G. Angustifolia en el área de almacenaje del proveedor.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17, muestra los culmos de bambú en el momento que fueron entregados por el proveedor. El proveedor aplicó un tratamiento de aceite y grasa quemada con un baño de diésel a los culmos, e indicó que a éstos aún debían secarse. Se evitó el contacto de los culmos con la humedad y dejándolos reposar en un lugar donde recibieran una corriente de aire por 3 semanas. Posteriormente, se trasladaron al taller de metalmecánica de UVG, tomando las precauciones de protegerlos de la humedad, del contacto directo con el sol y del contacto con el suelo. Todos los culmos presentaban deformaciones con respecto a su eje axial. Al dejar pasar 4 semanas para el secado del bambú, se procedió a clasificar y registrar las dimensiones de los culmos con respecto a su especie. A continuación, se presentan las Tablas 18 a 29 donde se los registra las dimensiones de los culmos.

Bambú D. Asper

Tabla 18. Dimensiones de D. Asper A.

| D. Asper A | | |
|---------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 263.5 | cm |
| Espesor de la pared | 9.60 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 54.0 | 72.80 |
| 2 | 51.5 | 74.40 |
| 3 | 52.0 | 74.00 |
| 4 | 52.0 | 75.00 |
| 5 | 54.0 | 75.50 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Dimensiones de D. Asper B.

| D. Asper B | | |
|---------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 337.5 | cm |
| Espesor de la pared | 8.35 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 52.0 | 84.90 |
| 2 | 51.0 | 83.20 |
| 3 | 49.0 | 81.70 |
| 4 | 45.0 | 80.50 |
| 5 | 46.0 | 78.70 |
| 6 | 47.0 | 76.20 |
| 7 | 47.5 | 74.10 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Dimensiones de *D. Asper C*.

| <i>D. Asper C</i> | | |
|--------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 342.0 | cm |
| Espesor de la pared | 9.1 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 52.0 | 83.30 |
| 2 | 49.5 | 83.40 |
| 3 | 48.0 | 82.20 |
| 4 | 48.0 | 81.50 |
| 5 | 47.5 | 77.80 |
| 6 | 48.0 | 77.10 |
| 7 | 49.0 | 74.10 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Dimensiones de *D. Asper D*.

| <i>D. Asper D</i> | | |
|--------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 257.0 | cm |
| Espesor de la pared | 8.55 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 46.9 | 77.10 |
| 2 | 48.0 | 78.50 |
| 3 | 48.0 | 79.50 |
| 4 | 50.0 | 83.50 |
| 5 | 51.6 | 82.50 |
| 6 | 53.0 | 84.00 |

Fuente: Elaboración propia.

Bambú *G. Verticillata*

Tabla 22. Dimensiones de *G. Verticillata A*.

| <i>G. Verticillata A</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 294.0 | cm |
| Espesor de la pared | 5.00 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 63.0 | 69.85 |
| 2 | 61.0 | 69.50 |
| 3 | 59.0 | 69.40 |
| 4 | 57.0 | 68.50 |
| 5 | 54.0 | 67.00 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Dimensiones de *G. Verticillata B*.

| <i>G. Verticillata B</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 284.5 | cm |
| Espesor de la pared | 5.20 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 50.5 | 63.00 |
| 2 | 55.0 | 68.60 |
| 3 | 58.0 | 68.60 |
| 4 | 62.0 | 69.70 |
| 5 | 59.0 | 67.80 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Dimensiones de *G. Verticillata C*.

| <i>G. Verticillata C</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 298.2 | cm |
| Espesor de la pared | 4.40 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 57.2 | 67.30 |
| 2 | 57.5 | 67.40 |
| 3 | 60.0 | 67.00 |
| 4 | 61.5 | 66.80 |
| 5 | 62.0 | 68.00 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Dimensiones de *G. Verticillata D*.

| <i>G. Verticillata D</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 290.5 | cm |
| Espesor de la pared | 4.92 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 54.5 | 65.00 |
| 2 | 57.0 | 67.30 |
| 3 | 59.5 | 68.00 |
| 4 | 60.1 | 67.00 |
| 5 | 61.0 | 69.50 |

Fuente: Elaboración propia.

G. Angustifolia.

Tabla 26. Dimensiones de *G. Angustifolia A.*

| <i>G. Angustifolia A</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 310.0 | cm |
| Espesor de la pared | 10.00 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 21.0 | 72.50 |
| 2 | 21.0 | 70.50 |
| 3 | 22.5 | 71.00 |
| 4 | 23.0 | 71.90 |
| 5 | 23.8 | 70.80 |
| 6 | 24.0 | 70.70 |
| 7 | 25.7 | 68.80 |
| 8 | 26.5 | 67.70 |
| 9 | 28.0 | 65.10 |
| 10 | 29.5 | 65.30 |
| 11 | 31.0 | 64.20 |
| 12 | 34.0 | 63.70 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Dimensiones de *G. Angustifolia B.*

| <i>G. Angustifolia B</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 295.5 | cm |
| Espesor de la pared | 9.90 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 22.0 | 89.80 |
| 2 | 23.0 | 89.70 |
| 3 | 24.0 | 87.80 |
| 4 | 25.0 | 86.50 |
| 5 | 25.0 | 88.60 |
| 6 | 27.0 | 86.40 |
| 7 | 28.0 | 86.60 |
| 8 | 29.0 | 85.90 |
| 9 | 30.0 | 82.60 |
| 10 | 31.5 | 79.50 |
| 11 | 31.0 | 79.70 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Dimensiones de *G. Angustifolia C*.

| <i>G. Angustifolia C</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 307.0 | cm |
| Espesor de la pared | 10.10 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 32.0 | 64.10 |
| 2 | 31.0 | 66.70 |
| 3 | 29.5 | 67.70 |
| 4 | 28.0 | 67.80 |
| 5 | 26.5 | 68.50 |
| 6 | 26.5 | 71.60 |
| 7 | 24.0 | 70.40 |
| 8 | 24.0 | 71.00 |
| 9 | 23.0 | 73.10 |
| 10 | 22.0 | 71.60 |
| 11 | 21.5 | 71.10 |
| 12 | 21.0 | 72.00 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Dimensiones de *G. Angustifolia D*.

| <i>G. Angustifolia D</i> | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Longitud del culmo | 293.0 | cm |
| Espesor de la pared | 8.90 | mm |
| Entrenudos | Longitud [cm] | Diámetro [mm] |
| 1 | 32.0 | 77.50 |
| 2 | 31.0 | 77.50 |
| 3 | 29.0 | 78.10 |
| 4 | 28.0 | 78.80 |
| 5 | 27.5 | 84.20 |
| 6 | 26.0 | 83.70 |
| 7 | 25.0 | 84.00 |
| 8 | 25.5 | 86.00 |
| 9 | 24.0 | 87.50 |
| 10 | 23.0 | 87.80 |
| 11 | 22.0 | 88.00 |

Fuente: Elaboración propia.

G. Evaluación de calidad del bambú adquirido para el proyecto

Tabla 30. Evaluación de requisitos para los culmo de bambú.

| Requisitos para los culmo de bambú | | cumplido | no cumplido |
|------------------------------------|--|----------|-------------|
| A | La edad de los culmos debe estar en un rango de 4 a 6 años. | x | |
| B | Piezas no deben presentar una deformación inicial del eje. | | x |
| C | Las piezas no deben presentar fisuras perimetrales en los nudos ni fisuras longitudinales lo largo del eje neutro. | x | |
| D | No deben haber perforaciones de insectos en el bambú. | x | |
| E | No debe haber signos de pudrición. | x | |
| F | Debe tener tratamiento encontrar de insectos. | x | |
| G | Los culmos no deben exponerse al sol directo al estar almacenados. | x | |
| H | Al secarse deben tener las dimensiones prevista en el diseño (6.5 cm – 8 cm). | x | |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 30, muestra el cumplimiento de los requisitos establecidos para el bambú que se utilizará en la manufactura. Se decidió utilizar todos los culmos de bambú, aunque estos presentaran deformaciones respecto a su eje axial, incumpliendo con el requisito B. Se determinó utilizarlos porque había una cantidad limitada de bambú, y se deseaba construir un primer prototipo únicamente para evaluarlo por lo que no era crítico incumplir el requisito. Se programó un tiempo de 6 días para la práctica del proceso de manipulación del bambú, previo a iniciar la manufactura correspondiente. Este proceso incluyó los siguientes pasos: cómo sujetar el culmo de bambú en las mesas de trabajo, velocidad de perforado, practicar del tallado de las bocas de pescado e interacción de métodos para remover material con el formón. A continuación, las observaciones encontradas:

b. Observaciones preliminares

Las especies *D. Asper* y *G. Angustifolia* presentan los mayores diámetros y el mayor espesor de pared del culmo. Por otro lado, la *G. Verticillata* presenta una pared del culmo mucho más delgada que las otras dos especies; siendo, por ende la más liviana entre las tres. Las Tablas 16 a 19 muestran que en la *G. Verticillata* los culmos son conformados por 5 segmentos de entrenudos, mientras que en la *G. Angustifolia* entre 11 a 12 segmentos de entrenudos. El *D. Asper* se encuentra entre la *G. Verticillata* y la *G. Angustifolia* con 5 a 7 segmentos de entrenudos que conforman el culmo. Algo por destacar es la ondulación visible y presente en la especie *G. Verticillata*, mientras que para las otras especies la ondulación

está presente, pero a un menor grado. La ondulación es más evidente cuando el culmo es cortado en divisiones.

c. Ensayo de manufactura

Se realizaron ensayos para practicar la manufactura de la unión de boca de pescado con el bambú *D. Asper* D secciones 4-7 y *D. Asper* A secciones 1-4. Para practicar la perforación del bambú se utilizó la *G. Verticillata* D sección 5, *G. Angustifolia* D sección 10, y *D. Asper* A sección 5.

i. Ensayo de la manufactura de boca de pescado.

La función de la boca de pescado es crear una unión perpendicular entre dos piezas. Para realizar la boca de pescado se definieron dos partes, la pieza en la cual se realizará la boca de pescado y la pieza a la cual se va a unir. Así mismo, se debe determinar en qué punto del culmo de bambú se ejecutará la unión. Este paso es crítico debido a la naturaleza del bambú, debido a que el diámetro varía en el mismo culmo, complicando el acople de éstos. Por lo que se establece el diámetro de la pieza a la cual se unirá y el valor del radio respectivo, este valor será la profundidad de la boca de pescado. Posteriormente, se asegura la parte más profunda no esté en una separación a un rango de 6 cm. De un nudo, con el fin de distribuir las fuerzas al estar acoplados los culmos de bambú.

La boca de pescado no se puede realizar con la especie *G. Verticillata*, debido al espesor de pared que posee el culmo.

Para remover el material se utilizó el formón aplicando impactos con mediana y fuerte intensidad, acompañado por el movimiento de la muñeca de la mano; removiéndose el material con el filo del formón. Los golpes tienen que propiciarse en ángulo con respecto a la cara del culmo. Si el golpe se da de forma perpendicular se daña las fibras, afectando la integridad de culmo.

Para mejorar el acoplamiento de la unión de boca de pescado, de modo iterativo, se coloca en su posición de acople y se remueve el material con el formón, o usando una lija hasta tener el mayor contacto posible. Es importante señalar, que, al usar la lija, ésta debe de aplicarse en ángulo para evitar arrancar fibras del culmo. No se debe remover mucho material del diámetro interior del culmo, porque esto, disminuye el área de la unión, volviéndola frágil en

las áreas de las puntas salientes. Por otro lado, se debe dejar un área considerable para que se pueda apoyar la otra pieza, aprovechando el mayor contacto y disminuyendo los esfuerzos que pueden llevar a la falla de la unión.

ii. Ensayos de perforación del bambú.

Se realizaron dos pruebas de perforación del culmo para conocer la respuesta del bambú al ser perforado. Primero, se probó con una broca de ½ pulgada. Se presentó dificultad para sujetarlo, ya que las dimensiones del bambú no permitían que este fuera sujetado con facilidad ni que estuviera plano, a una cara de la mesa de trabajo del taladro. Al ser perforado en la cara exterior, no se produjo ningún daño a las fibras del bambú. Se utilizó para toda perforación una velocidad de entre 200 y 250 rpm., porque al utilizar velocidades mayores provoca que el bambú se quiebre al ser perforado. Al seguir con la perforación, y, al salir la broca por el otro lado de la cara del bambú, ésta arrancaba las fibras del culmo, dañando su integridad. Por lo que se utilizó cinta adhesiva en la cara exterior opuesta, evitando que las fibras fuesen arrancadas en la perforación. Este ajuste, se debió a que en la alineación se presentaba dificultad para obtener una exactitud concéntrica de los centros de agujeros en ambas caras. Posteriormente, se procedió a probar con una broca de 1 pulgada, obteniendo los mismos resultados.

Se evitó poner agujeros en serie, debido a la concentración de esfuerzos en el culmo. Para evitar esto, se colocaron agujeros separados por nudos. En el diseño solo se presenta una serie de agujeros ubicada en el culmo del balancín, teniendo presente que serán puntos críticos de esfuerzos de la máquina.

Para la manufactura de los componentes del prototipo fue necesario afilar continuamente las herramientas, debido a que el bambú disminuye considerablemente su filo, complicando la perforación.

H. Manufactura

La construcción de cada componente de la máquina implicó elaborar las piezas que constituyen el componente, armar las piezas para generar el componente y evaluar la interacción entre piezas.

A continuación, se presentan las etapas en que se trabajó cada componente, para la construcción de la máquina elíptica:

- A. Etapa 1- Piezas para la estructura principal
 - i. Estructura principal
 - 1. Base de estructura principal
 - 2. Pivote trasero
 - 3. Pivote delantero
 - 4. Soporte trasero
 - 5. Agujeros
 - ii. Sistema de pernos tensores
- B. Etapa 2 – Mecanismo de 4 barras
 - i. Manivela
 - 1. Platinas
 - 2. Eje trasero
 - 3. Eje secundario
 - ii. Biela
 - iii. Balancín
 - iv. Platinas para uniones de mecanismo de 4 barras
 - 1. Agujeros y agujeros en bielas
 - 2. Agujeros para sujetar platinas
- C. Etapa 3 – Uniones
 - i. Eje delantero
 - 1. Agujeros en eje delantero
 - ii. Revisión
 - 1. Ajustes
 - 2. Soldadura
 - iii. Soporte de pies
 - iv. Antideslizante

A. Etapa 1 Piezas para la estructura principal

i. Estructura principal

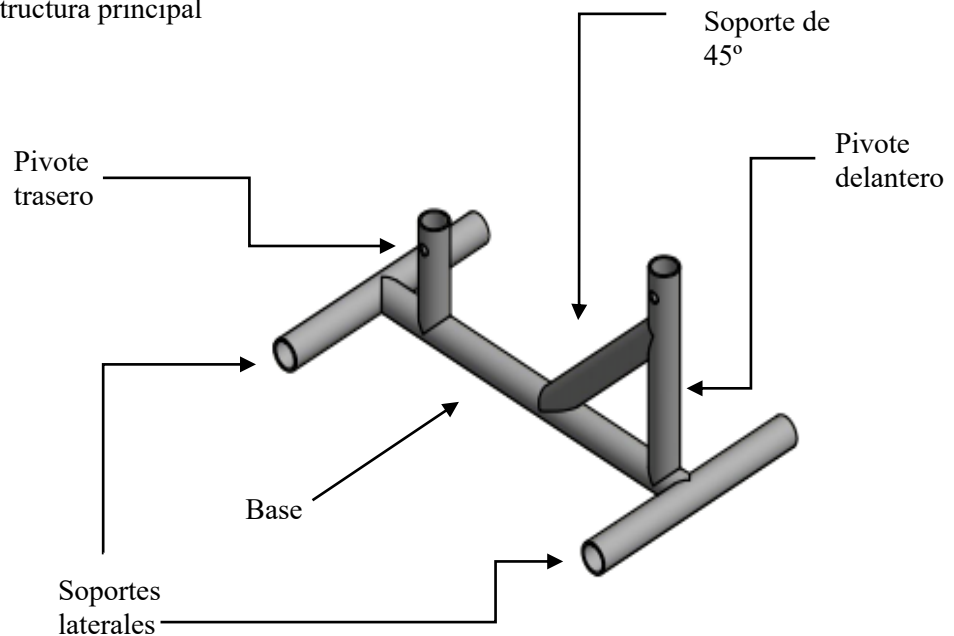


Figura 18. Estructura de soporte principal.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18, se detalla las piezas y nombres respectivos que componen la estructura principal. En Anexo B, se incluyen los planos de diseño que se utilizaron para la manufactura de las distintas piezas, que componen la estructura principal. A continuación, se definen los segmentos de bambú y la especie:

1. Base de estructura principal

Se escogió *G. Angustifolia* B, entre nudos 1 a 5. Debido a los entrenudos que presentaba el culmo en las puntas estarían a una distancia no mayor de 6 cm. a un nudo, con el fin de distribuir las fuerzas en estos segmentos al tensar la máquina. Se tomó en cuenta la posición de los agujeros que se realizarían posteriormente, para que los pivotes estuvieran encima de un nudo. En el Anexo C, se pueden desglosan las dimensiones del diseño.

2. Pivote trasero

Se utilizó la especie *G. Angustifolia* A, en secciones de entre nudos de 4 a 6. Se buscaba que la parte que tendría la boca de pescado estuviera cerca de un nudo para distribuir el peso del usuario. Plano en Anexo D.

3. Pivote delantero

En el Anexo E, se encuentra el plano del pivote delantero para el cual se empleó la *G. Angustifolia A*, de las secciones 1 a 3. Para esta pieza se priorizó que la misma presentara un menor grado de deformación con respecto al eje axial para que no complicara el manejo al ser perforada y mantener las dimensiones de diseño.

4. Soporte lateral delantero

Con las dimensiones detalladas en el Anexo F, para obtener el soporte delantero se utilizó la *G. Angustifolia B* sección 8 a 10. Esta presentó menores deformaciones a simple vista sin tener ramas ni nudos que sobresalieran dando una forma irregular.

5. Soporte lateral trasero

Se siguió el plano del Anexo G para el soporte trasero. Se cortó la *G. Angustifolia B* secciones 6 a 7, utilizando el mismo culmo para el lateral delantero, con el fin de mantener la simetría. Se buscó que estuvieran lo más rectas posibles para que tuvieran mayor área de apoyo.

6. Soporte de 45 grados

Se empleó el bambú *D. Asper A*, 1 a 3 para el corte de 45 grados. Se siguieron las dimensiones que se establece en el plano, Anexo H. No se logró colocar el soporte de 45 grados porque al realizar la boca de pescado no se obtenía la dimensión adecuada para el acople con la otra pieza de bambú. Las distancias entre nudos no permitían colocar una pieza como el diseño lo indicaba. Se decidió no realizar este soporte, debido a que no se pudo manufacturar con las especificaciones deseadas del diseño y en su lugar, se utilizó el sistema de perno tensor para dar soporte al pivote delantero de la estructura del soporte principal.

ii. Agujeros

En el Anexo A, se indica la posición de diseño de las piezas. Al terminar la manufactura de las piezas, que conforman el soporte principal, se ensambló de tal manera que se pudiera visualizar donde irá cada parte, como se observa en la Figura 19. Al observar cómo se acoplarían las partes, previo a hacer los agujeros, se pudo establecer la alineación de las piezas y determinar si alguna necesitaba ser corregida.



Figura 19. Ensamble de soporte principal sin agujeros.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron los agujeros pertinentes para cada pieza. Se mantuvo la integridad del culmo no dañándolo al ser perforado y se buscó que los agujeros quedaran concéntricos. Esto, se logró al seguir el método explicado previamente.

ii. Sistema de pernos tensores

El mecanismo de perno tensor conformado por una arandela soldada a una varilla roscada se retiró, debido a que se requería de una soldadura a la varilla de rosca galvanizada. Se evitó soldar con el fin de aprovechar la rosca de la varilla. Se utilizó un cilindro de acero sustituyendo la arandela, para lo cual se perforaron agujeros correspondientes al diámetro del perno y a una rosca interna compatible a la varilla. Para la rosca interior, se manufacturó de $\frac{1}{2}$ pulgadas. En la Figura 20 y 21, se puede observar el conjunto de sistema perno tensor. Como se puede observar en la Figura 22, los dos sistemas de perno tensores se cruzan.

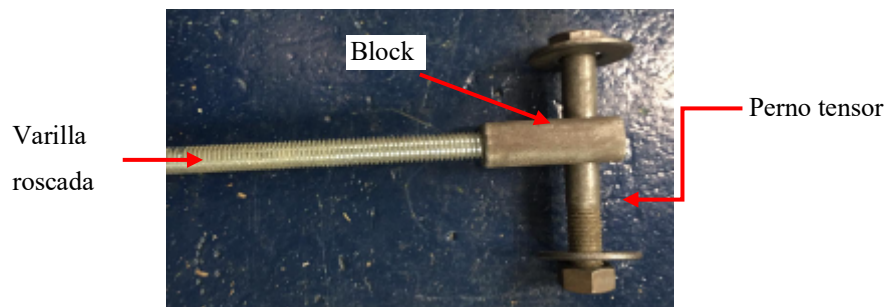


Figura 20. Cubo de acero adjunto a varilla con agujero.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Sistemas de perno tensor intersectados.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Vista lateral de conexión de pernos tensores

Fuente.: Elaboración propia.

iii. Falla por secado

El ambiente, en el cual se almacenaron las piezas terminadas, aceleró el proceso de secado, debido al calor y la falta de flujos de aire, provocando fisuras longitudinales entre los nudos de los culmos. Por este fenómeno, el culmo de *G. Verticillata* D (completo) se desechó y el soporte lateral trasero se manufacturó nuevamente con la especie *G. Angustifolia* A secciones 10 a 12.

B. Etapa 2 – Mecanismo de 4 barras

i. Manivela

La Figura 23, muestra el diseño del sistema manivela con todos sus componentes.



Figura 23. Sistema de manivela.

Fuente: Elaboración propia.

Acorde a las dimensiones de la manivela (Anexo I), la lámina de acero negro de 3 x 3 pies fue cortada por medio de una cortadora de plasma a las dimensiones previamente mencionadas. El diseño de la manivela consiste en un ángulo de 45° de las platinas y para obtener este ángulo se utilizó una dobladora. A estas platinas no se les perforó inicialmente, ya que se prefirió esperar a tener todas las piezas del mecanismo y, posteriormente, perforar, con el fin de mantener las dimensiones del mecanismo de 4 barras.

2. Eje trasero

Este eje girará libremente apoyado en los cojinetes los cuales se apoyaran en el eje secundario. Este eje se manufacturo de un cilindro de acero de 25.4 mm de diámetro. Se corto un segmento con longitud de 17 mm y se redujo su diámetro a 12 mm, por medio del torno. Posteriormente, se realizo la rosca en las extremidades del eje para el sistema de contratuerca por medio de la terraja para roscar.

3. Eje secundario

El eje secundario, sostendrá los rodamientos por medio de agujeros abocardados y el eje secundario se apoyara en el culmo. Este eje se manufacturó de un cilindro de acero de 25.4 mm. Se corto un segmento de longitud de 96.0 mm. Por medio del torno, se realizó el agujero abocardado en las extremidades, con una profundidad de 6.0 mm. Por medio iterativo, se removió la cara interior del agujero abocardado hasta que se obtuviera un ajuste de

interferencia con los rodamientos. En la Figura 24, se muestra el proceso de manufactura del eje secundario. En la Figura 25, se puede observar el sistema de manivela finalizado.



Figura 24. Proceso de manufactura de eje secundario.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 25. Vista isométrica, frontal y lateral de manivela con solo una platina.

Fuente: Elaboración propia.

Al terminar, se unió el sistema de manivela al pivote trasero, por medio de un agujero en el culmo. Se buscó que el eje axial del sistema de manivela estuviera paralelo al suelo. En la Figura 26, se muestra el sistema de manivela y pivote trasero unidos.



Figura 26. Sistema de manivela y pivote trasero.

Fuente: Elaboración propia.

ii. Biela

Se utilizó *G. Angustifolia* C secciones 6-9 y 9-12, siguiendo las dimensiones planteadas en el Anexo O. El diseño original presentaba dos agujeros para fijar las platinas de extensión del eslabón, pero se cambió a solo uno. Era necesario que los segmentos permitiesen que los agujeros que sostendrían las platinas estuvieran separados por un nudo, e igualmente, que se tuviera un nudo en medio del eslabón para soportar la carga del usuario.

iii. Balancín

Para manufacturar el par de balancines, se utilizó la especie *G. Verticillata* B, secciones 2- 3 y 4-5, de acuerdo con las dimensiones planteadas en el diseño (Anexo K).

iv. Platinas para uniones de mecanismo de 4 barras



Figura 27. Platina para unión de mecanismo de 4 barras.

Fuente: Elaboración propia.

El Anexo L presenta las dimensiones de las platinas. Por medio de una cortadora de plasma, se cortó la plancha de 76.2 mm por 76.2 mm utilizada previamente. Siguiendo las dimensiones adjuntadas en el Anexo P, se manufacturaron 8 platinas. El diseño inicial contemplaba que la platina tuviera dos agujeros para su unión con el culmo de bambú. Se modificó a solo un agujero, con el fin de reducir la cantidad de veces que se perfora el culmo para resguardar su integridad.

Al tener las 8 platinas para la extensión de los eslabones de 4 barras y los pares de culmos, las bielas y balancines, se definieron las ubicaciones de los agujeros en los culmos de bambú donde irían sujetas las platinas para funcionar como extensión del bambú y para completar el eslabón. Para definir el tamaño del eslabón (culmo + platina), se utilizó las dimensiones del diseño del mecanismo de 4 barras. En la Tabla 31, visualizan las dimensiones del mecanismo de 4 barras establecidas en el diseño.

Tabla 31. Dimensiones del mecanismo de 4 barras.

| Dimensiones del mecanismo de 4 barras | |
|---------------------------------------|----------|
| | Diseño |
| Biela | 76.10 cm |
| Manivela | 14.52 cm |
| Balancín | 32.63 cm |
| Bancada | 74.13 cm |

Fuente: Elaboración propia.

Para introducir la platina en la biela y en el balancín, se removió la parte interior del bambú. Para que las platinas compartieran el mismo eje axial del culmo de bambú, se trazó una línea en el culmo como referencia. De igual forma, se trazó una línea en el culmo de la biela y el balancín, buscando que los agujeros se encontraran en la misma línea, para unir las platinas y el culmo. El resultado final se muestra en las Figuras 28 y 29. El filo de las platinas se eliminó por medio de la fresa.



Figura 28. Eslabón: Biela.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 29. Eslabón: Balancín.

Fuente: Elaboración propia.

C. 3^a. etapa – Uniones

i. Eje delantero

El eje delantero se manufacturó de un tubo de aluminio 140 de 2.54 cm de diámetro según especificación de diseño. En el Anexo Q se presentan las dimensiones del eje delantero.

Para posicionar el agujero del eje delantero, en el culmo del pivote delantero y balancines, se armó la estructura del soporte principal. En el pivote delantero se marcó a la altura especificada en el diseño donde se ubicaría el eje delantero. Posteriormente, se marcó una línea guía en el pivote delantero como referencia del eje axial, dando la ubicación final del agujero en el pivote delantero. Se marcó la posición del agujero para el eje delantero en los balancines, utilizando como referencia la marca del agujero del pivote delantero. Se prosiguió a realizar los agujeros para que el eje delantero y el agujero tuvieran un ajuste con juego. Se taladró los agujeros con una broca de 2.54 cm de diámetro. La pieza de balancín se fisuró debido a la vibración; por lo que el balancín derecho se sustituyó por la *G. Verticillata C*, secciones 4 y 5.

1. Agujeros en el eje delantero

Se introdujo el eje delantero en el agujero del pivote delantero, armando el sistema de pivote delantero con el eje (Figura 29), e introduciendo los balancines en el eje delantero en sus respectivos agujeros. Según el diseño, se tiene una separación de 13 cms. entre las paredes del culmo del pivote delantero y los balancines. Se marcó las posiciones del culmo en el eje delantero respetando el plano en Anexo Q.

Se extrajo el eje delantero y se prosiguió a perforar agujeros pasados con un diámetro de 0.64 cm. Estos agujeros sirven para que los pasadores mantengan la distancia entre los ejes axiales del pivote delantero y los balancines. Por medio del torno, se marcó una línea recta en el eje axial del tubo, facilitando la tarea de poner colineales los agujeros para los pasadores. Al concluir el proceso de perforación, se introdujo el eje delantero en el agujero del pivote delantero y consecuentemente, los balancines, con los tornillos de 0.64 cm de diámetro y sus respectivas tuercas. En la Figura 30, se muestra el producto final.



Figura 30. Pivote delantero con eje delantero y pasadores.

Fuente: Elaboración propia.

ii. Revisión

La revisión determinó si el proceso de manufactura era el correcto para obtener la interacción de los componentes de la máquina elíptica, procurando dar prioridad a la

movilidad del mecanismo. Previo a la revisión, se armó la máquina elíptica sin los soportes de los pies, como se muestra en la Figura 31.



Figura 31. Máquina elíptica armada sin soporte de pies y antideslizante.

Fuente: Elaboración propia.

La revisión consistió en 2 partes:

La primera parte consistió en impulsar la máquina elíptica con el brazo, moviendo el balancín en su parte superior, realizando varias oscilaciones e impulsando la máquina elíptica con el brazo por medio de la manivela y ejecutando varias revoluciones.

En la segunda parte, se examinó que el sistema de contratuerca mantuviera fijo el ángulo de 180 grados entre las manivelas del eje trasero.

Se observó que al armar la estructura de soporte principal, no se presentó ningún problema relacionado con forzar alguna pieza. Al armar el mecanismo de barras en la junta entre la biela y el balancín, se presentó la dificultad de introducir el pasador en doble voladizo, provocando una estructura precargada. Esto fue provocado debido a que las platinas presentaban una desalineación con respecto al eje axial del culmo. Lo que causaba dicho desalineamiento era la posición del agujero del perno que define la posición de las platinas. Esto se puede apreciar en la Figura 32.



Figura 32. Junta entre balancín y biela.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera prueba al impulsar la máquina elíptica por medio del balancín se obtuvieron las posiciones estacionarias esperadas en el momento colineal entre la manivela y la biela (extendido y traslapado). Durante la oscilación, la fuerza requerida para mover el mecanismo variaba, causando un movimiento pausado; estancándose en diferentes puntos, diferentes a los estacionarios. Al revolucionar la manivela, realizaba la rotación de 360 grados con respecto al eje trasero, sin ninguna complicación, es decir, no se interrumpía en las posiciones estacionarias pero, ocasionalmente, era necesario variar la fuerza para generar la rotación.

Se determinó que el sistema de las platinas, que funcionan como extensión de los eslabones, estaba produciendo una mayor fricción de lo esperado debido a la incorrecta alineación de las platinas con sus respectivos culmos. Se identificó que el problema derivaba de los agujeros en los cuales las platinas se sujetaban. Se observó que el eje delantero presentaba un ángulo con respecto al tronco de la estructura principal, incidiendo en la posición de los balancines, al no estar en forma perpendicular. Fue necesario mejorar la alineación entre los componentes. Estos ajustes se mencionarán posteriormente.

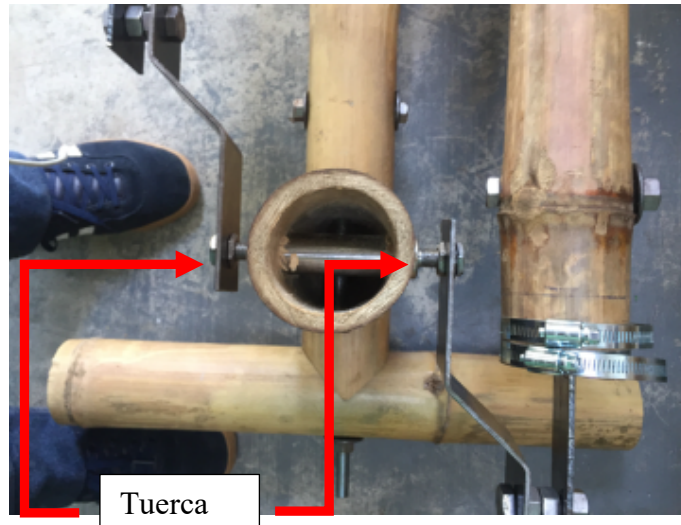


Figura 33. Tuerca manteniendo fija la posición de las manivelas.

Fuente: Elaboración propia.

Para fijar el ángulo entre las manivelas y evitar su desplazamiento en el eje trasero se utilizó el sistema de contratuerca mostrado en la Figura 33. Para la segunda parte, se colocó peso sobre la manivela y se determinó cambiar el ángulo con el propósito de revisar el sistema de contratuerca. Al aplicar la carga el sistema de contratuerca cedió, provocando que una manivela se desplazara a favor de las agujas del reloj y la otra en sentido contrario. Se decidió soldar, buscando dejar fijo el ángulo entre las manivelas, priorizando el requerimiento 3.3.0.b, “Las manivelas deben un ángulo de 180° entre ellas.” sobre el requerimiento 3.3.0.c, “La manivela debe permitir desmantelarse.”.

Se observó que el pivote trasero presentaba una fisura localizada en la parte interna del culmo. Esto se pudo originar por dos causas: el calor provocó que el bambú se secase de forma excesiva o, al apretar el perno tensor se generó la falla.

i. Ajustes

Basado en las conclusiones obtenidas de la revisión se establecieron los siguientes ajustes:

1. Al manufacturar los agujeros de los pivotes, primero se realizarían los agujeros de los pernos tensores. Posteriormente, se colocarían en el soporte principal los pivotes, con sus respectivos sistemas de pernos tensores para dejarlos fijos. Al tener fijos los pivotes, se marcaría la posición de los agujeros de acuerdo con el diseño.

2. Al realizar las bocas de pescado de los pivotes de la estructura, se aumentaría el área de contacto entre culmos, con el fin de que, al ser fijadas en su posición, no presenten ningún desnivel en la unión, que podría afectar el alineamiento.

3. Al volver a manufacturar el pivote delantero, para mejorar la alineación del agujero para el eje delantero, se debería procurar que quedara lo más paralelo posible con respecto al eje trasero. Utilizar *G. Angustifolia* D, secciones 3 a 5.

4. Al volver a manufacturar el pivote trasero, debido a la falla presentada, utilizar *D. Asper* B secciones 1 a 2.

5. Al volver a manufacturar los balancines con *G. Verticillata* A secciones 1 a 2 y 3 a 4, tomar mayor precaución al realizar los agujeros que sostendrán las platinas, procurando que sus centros sean colineales en el eje axial de los culmos de bambú.

6. En las bielas se deberá remover el material que está dentro del culmo, permitiendo que la platina tenga un mayor juego.

7. Se descartó la idea de utilizar mortero, debido a que se considera que limitará el juego de las platinas, concluyéndose y que debido a la alineación y el trabajo con los culmos de bambú, se tendría dificultad de alcanzar precisión y exactitud en la alineación de las piezas. Por lo que se prefirió contar con un juego que permita que los nodos puedan girar sin restricción.

8. Se decidió soldar la manivela-eje trasero- tuerca, con el fin de mantener fijo el ángulo entre manivelas y evitar su desplazamiento axial con respecto al eje trasero.

Luego de realizar los ajustes, la Figura 34 muestra cómo quedó la junta de doble voladizo entre la biela y el balancín. Se observa que una platina de la biela aún presenta un ángulo de desviación con respecto al eje axial del eslabón.



Figura 34. Junta de balancín-biela.

Fuente: Elaboración propia.

ii. Soldadura

Luego de realizar la prueba preliminar fue evaluado el requisito 3.3.0.c, por lo cual se procuró el poder desensamblar las partes de la manivela. Se consideró que la única pieza que no se podría desmantelar sería el eje trasero y la manivela. Se le dio prioridad al requisito 3.3.0.b, el cual nos permite que las manivelas mantengan una posición fija con un determinado ángulo fijo entre las mismas. Las manivelas se colocaron a 180°, una respecto de la otra y en esta posición, se soldaron las manivelas al eje trasero. Se utilizó un electrodo 6013, con corriente alterna a un voltaje de 90 voltios. En la Figura 35, se puede apreciar el producto final del sistema manivela/pivote y ejes traseros.



Figura 35. Sistema manivela, eje y pivote traseros (izquierdo); Vista superior de sistema manivela, eje trasero, pivote trasero (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

iii. Soportes de pies

Para fabricar los soportes de pies se utilizaron los planos en Anexos M a P. Se cortó la madera con una sierra y se perforaron los agujeros para las abrazaderas por medio del taladro, utilizando una broca de 0.64 cm de diámetro. Las abrazaderas unen el soporte de pie a la biela fijando su posición. Empleando pegamento de contacto, se le colocó una lija No. 60 para proveer un alto coeficiente de fricción entre el zapato del usuario y el soporte de pie. La Figura 36 muestra el producto final.



Figura 36. Soporte de pies.

Fuente: Elaboración propia.

iv. Antideslizante

Al tener armada la máquina elíptica se procedió a colocar la alfombra antideslizante en la parte inferior del soporte principal, para cumplir el requisito 1.0.0.f, “La estructura de desplazarse de su posición”. Se utilizó pegamento de contacto para la unión entre el antideslizante y el bambú. El antideslizante tuvo el doble propósito de fijar en su lugar el soporte principal y de elevar la máquina del suelo. Se procuró que la elevación fuera la suficiente para que las tuercas, que salían por debajo del soporte principal, no tocaran el suelo. Esto, se puede observar en la Figura 37.



Figura 37. Antideslizante debajo de la estructura principal.

Fuente: Elaboración Propia.

I. Evaluación del prototipo

La evaluación del prototipo se constituye de 3 pruebas, en las cuales el objetivo general es evaluar los requisitos establecidos en el principio de este trabajo. Estos requisitos se evaluaron en relación con las 3 pruebas. Cada prueba es basada en los conceptos operacionales del prototipo, que se estableció para su función. A continuación, se describe cada prueba.

A. Prueba A

a. Se observó el desplazamiento del eje axial del pivote delantero y del eje axial del pivote trasero del prototipo al subirse el usuario a la máquina:

B. Prueba B

a. Se observó el desplazamiento del eje axial del pivote delantero y del eje axial del pivote trasero del prototipo, al ser utilizado por el usuario; manteniendo el peso en un lado, en el soporte de pie.

C. Prueba C

a. Se confirmó el movimiento teórico de la manivela, el balancín y el punto medio en el pie del usuario.

b. Se observó el desplazamiento del eje axial del pivote delantero y del eje axial del pivote trasero del prototipo al ser utilizado, realizando 10 revoluciones la manivela.

Para el análisis del desplazamiento, se utilizó el programa Tracker para análisis de videos. Para las pruebas A, B y C se usó como punto de estudio, el punto en el eje axial del pivote trasero y el punto en el eje axial del pivote delantero. Se analizó el desplazamiento de estos puntos con respecto al eje x, con el fin de ver el desplazamiento al ser utilizado. Para la prueba C, se agregaron tres puntos de análisis: La junta de balancín-biela, la junta biela-manivela y el punto medio en los soportes de los pies.

A continuación, se presentan las gráficas en las cuales se visualiza el desplazamiento del punto en estudio, al realizar cada prueba. El eje “y” de la gráfica muestra el desplazamiento en metros, y el eje “x” el tiempo en segundos.

A. Prueba A. Subirse a la máquina,

1. Lado derecho

El usuario sube por el lado derecho de la máquina, subiendo primero su pie derecho en el soporte derecho, posteriormente, sube el pie izquierdo en el soporte izquierdo. En la Figura 38 y 39, se observa de forma frontal y trasera en Tracker respectivamente. En la Figura 38, se muestra la gráfica del desplazamiento del punto en el eje axial del pivote delantero, al subirse el usuario por el lado derecho de la máquina. En la Figura 39, se muestra la vista trasera del prototipo, con punto de observación en el eje axil del pivote trasero.

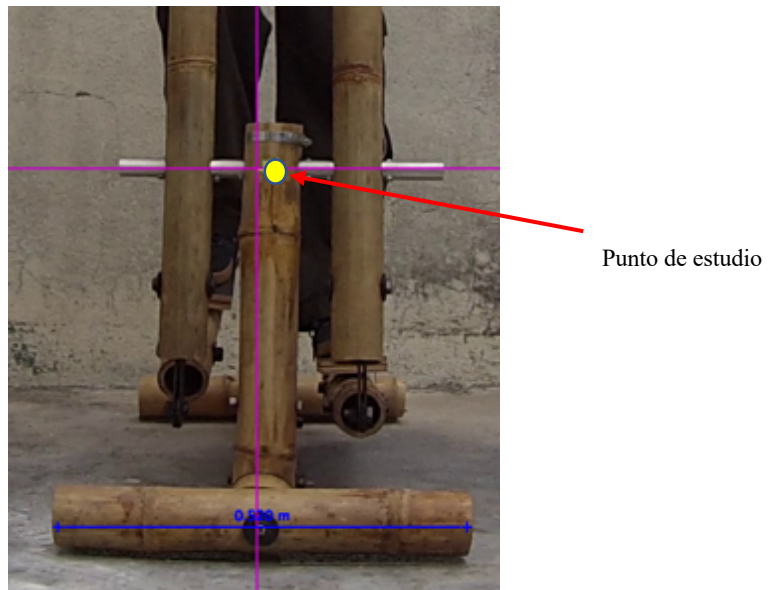


Figura 38. Gráfica de punto medio del pivote delantero, subirse por el lado derecho.

Fuente: Elaboración propia.

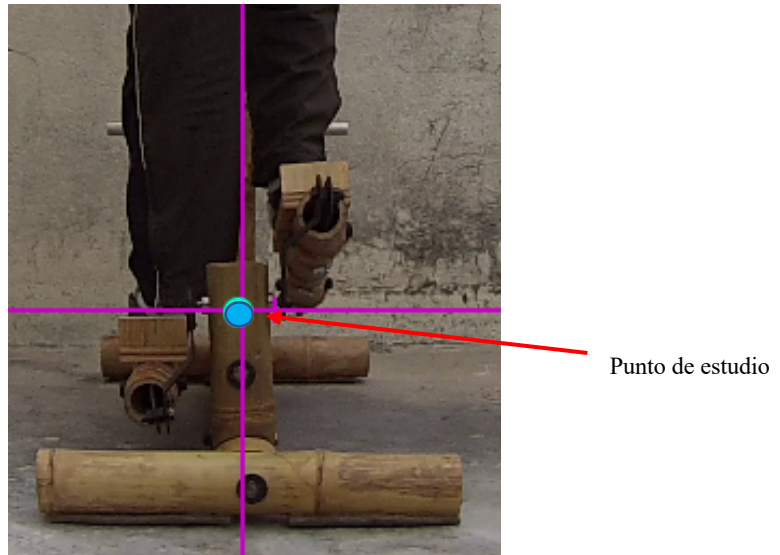


Figura 39. Gráfica de punto medio del pivote trasero, subirse por el lado derecho.

Fuente: Elaboración propia.

i. Observaciones

Al subirse el usuario la máquina produjo sonidos en el contacto de las uniones de bocas de pescado de los culmos de bambú. Este sonido se ubicó en las uniones del tronco de la estructura principal, en los soportes laterales y en las uniones de los pivotes con el tronco de la estructura principal. No se encontró ninguna falla en las piezas al realizar este procedimiento. El desplazamiento del pivote delantero fue mayor al del pivote trasero, es decir, hubo 1.40 cm de diferencia.

2. Lado izquierdo

El usuario se coloca al lado izquierdo de la máquina. Primero, coloca su pie izquierdo en el soporte izquierdo y posteriormente, pone su pie derecho en el soporte derecho. En la Figura 40, se puede apreciar el movimiento del eje axial del pivote delantero, como punto de estudio. En la Figura 41, se muestra la gráfica de los desplazamientos del pivote trasero, al momento de subirse el usuario.

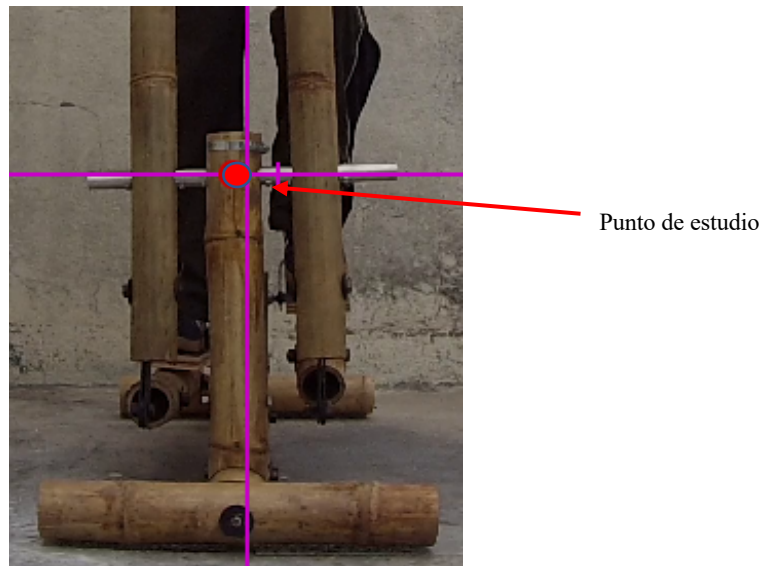


Figura 39. Gráfica de punto medio del pivote delantero, subirse por el lado izquierdo.

Fuente: Elaboración propia.

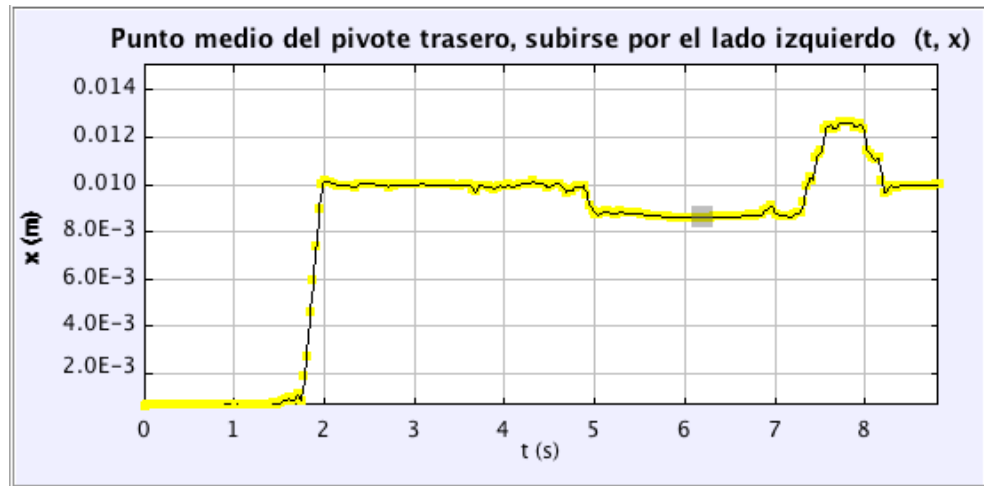
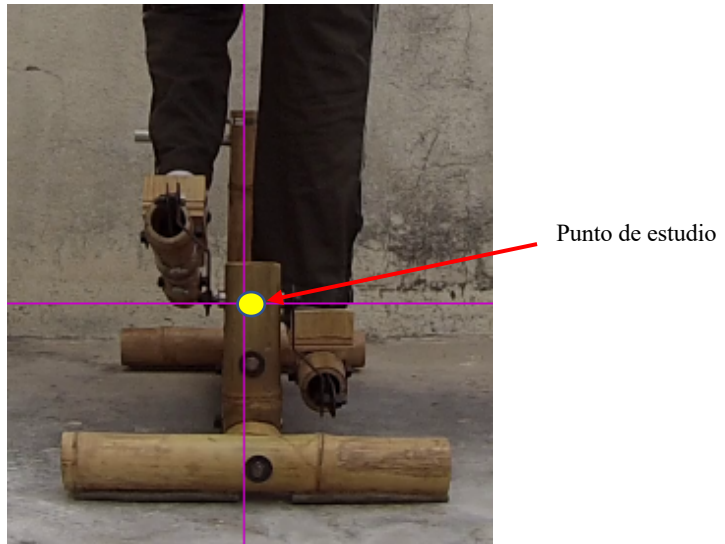


Figura 40. Gráfica de punto medio del pivote trasero, subirse por el lado izquierdo.

Fuente: Elaboración propia.

i. Observaciones

La máquina produjo los mismos sonidos de contactos en los culmos de bambú, que al subirse por el lado derecho. El desplazamiento en el pivote delantero se inclinó con dirección hacia donde estaba siendo aplicada la fuerza, estando el usuario subido en la máquina. Este podía por medio de los balancines mover su lugar. No se encontró ninguna falla en las piezas. El desplazamiento del pivote delantero fue mayor al del pivote trasero, en 1.50 cm de diferencia.

B. Prueba B. Dejar todo el peso en un lado

1. Lado derecho, peso en pie derecho

El usuario coloca su pie derecho en el soporte derecho y deja ir todo su peso al soporte del lado derecho. Las Figuras 42 y 43, muestran gráficamente el desplazamiento de los puntos de estudio en los ejes axiales del pivote delantero y pivote trasero, al estar sometidos a esta carga, respectivamente.

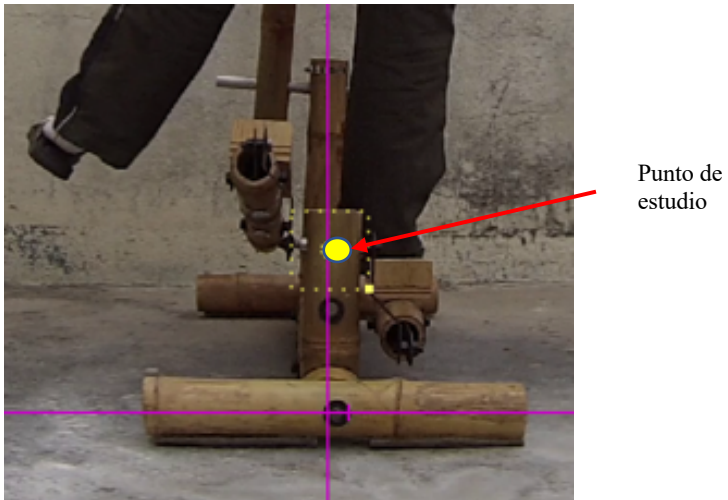
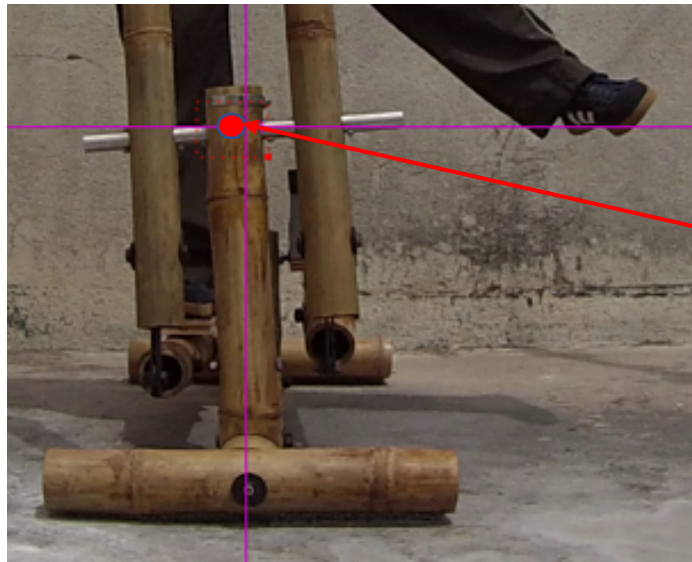


Figura 41. Gráfica de pivote trasero, peso en pie derecho.

Fuente: Elaboración propia.



Punto de estudio



Figura 42. Gráfica de pivote delantero, peso en pie derecho.

Fuente: Elaboración propia.

i. Observaciones

Se presentaron los mismos sonidos que en la prueba A, proviniendo de las uniones de boca de pescado. Debido a que no se colocaba el pie alterno, el prototipo quedaba inclinado hacia el lado derecho. El pivote delantero presentó un mayor desplazamiento que el pivote trasero por una diferencia de 1.6 cm. Sin embargo, se buscaron fallas, pero no se encontraron.

2. Lado izquierdo, pie izquierdo

El usuario coloca su pie izquierdo en el soporte izquierdo, sosteniendo todo su peso. En las Figuras 44 y 45, se muestra gráficamente, el desplazamiento del punto de estudio en el eje axial del pivote delantero y el punto en el eje axial del pivote trasero, al estar sometido al movimiento del usuario, respectivamente. En la figura se puede observar el desplazamiento con respecto a aleje “x” de los puntos de estudio.

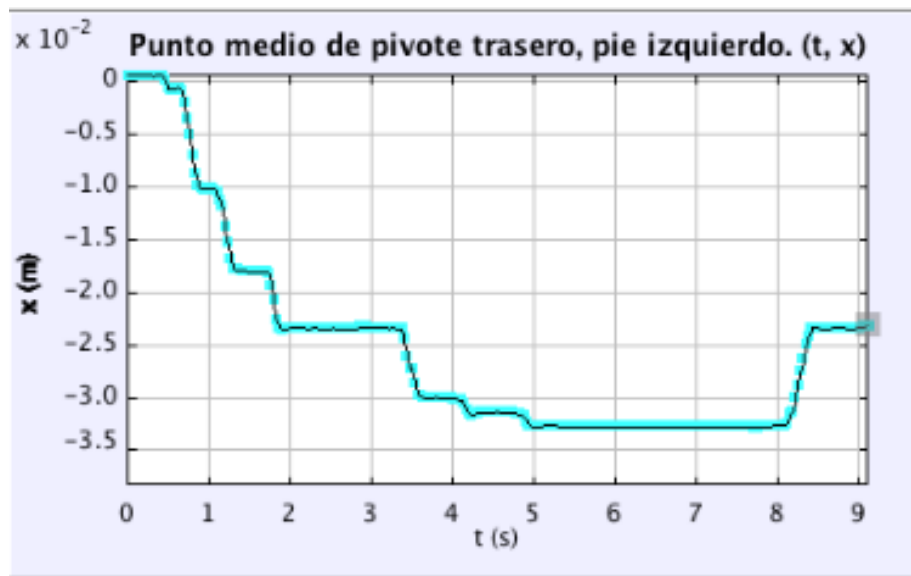
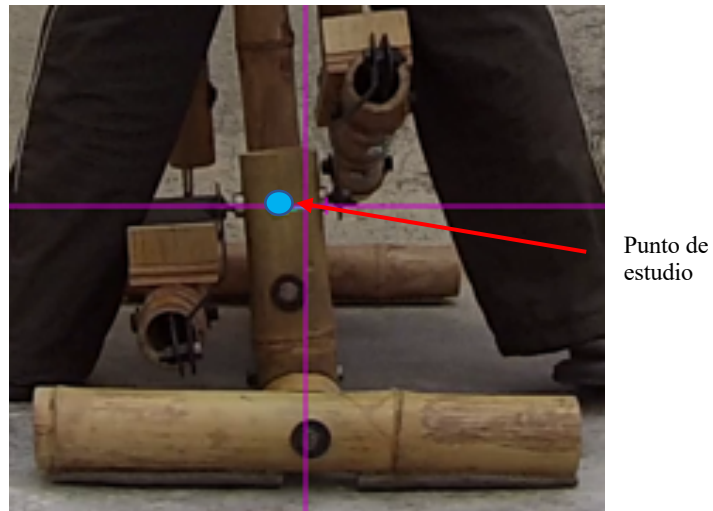


Figura 43. Gráfica de pivote trasero, peso en pie izquierdo.

Fuente: Elaboración propia.

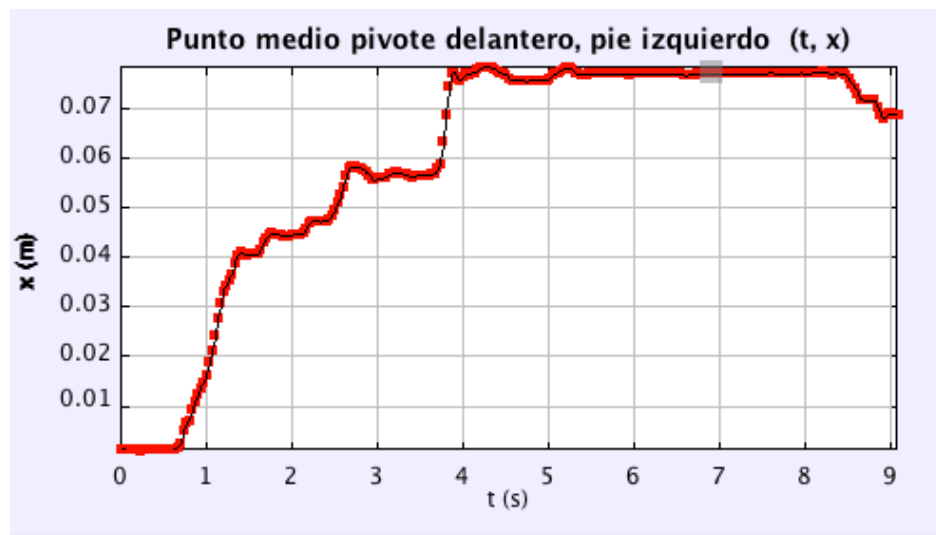
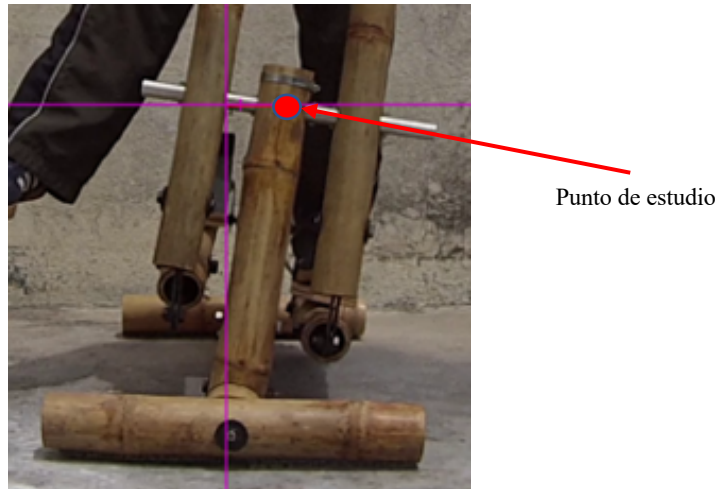


Figura 44. Gráfica de pivote delantero, peso en pie izquierda.

Fuente: Elaboración propia.

i. Observaciones

Al apoyar el pie izquierdo, el pivote delantero presentó un mayor desplazamiento en relación con el pivote trasero con una diferencia de 3.75 cm. Se produjeron los mismos sonidos en los culmos con boca de pescado. También, se presentó un menor regreso de ambos pivotes en comparación a cuando se dejó el peso en el soporte derecho. No se presentó ninguna falla en la máquina elíptica.

C. Prueba C. 10 Revoluciones de la manivela.

La máquina elíptica se probó con un usuario con una masa de 60 kg, realizando 10 revoluciones de la manivela para esta prueba. En la Figura 46, el punto celeste muestra la trayectoria de la junta entre el balancín y la biela. El color verde muestra la trayectoria de la junta de manivela y biela. En la Figura 47, la trayectoria de color rojo muestra un punto medio del soporte del pie. En la Figura 48, se puede ver el desplazamiento del eje axial del pivote delantero durante las 10 revoluciones. Al igual que en la Figura 49, se muestra el eje axial del pivote trasero. Concluida la prueba D, se analizó si existían fallas.

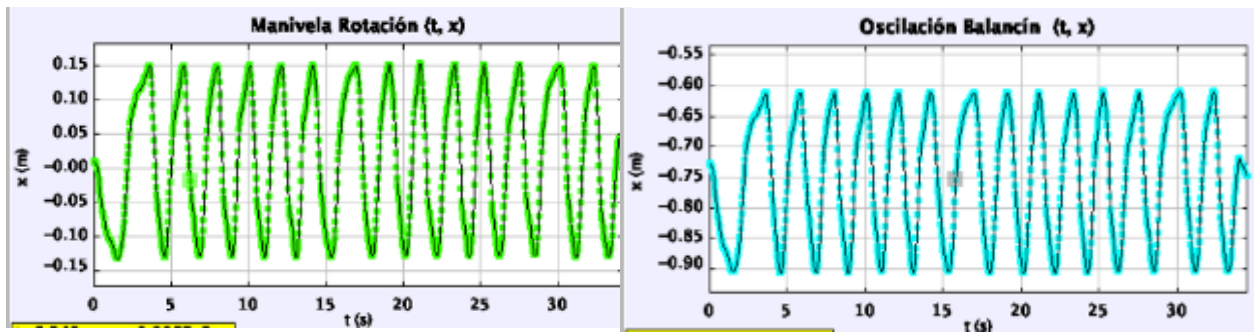
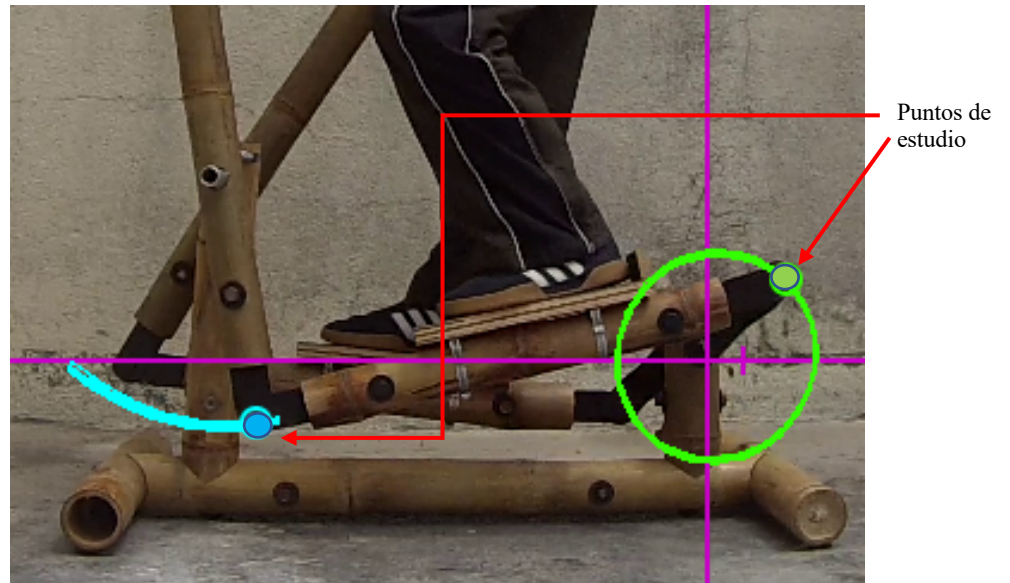
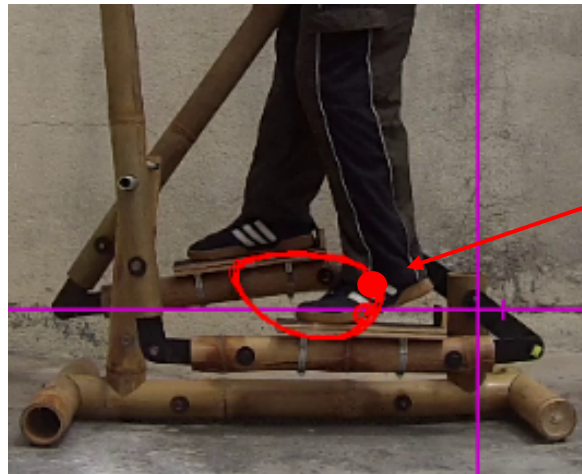


Figura 45. Análisis de trayectorias. (punto verde: nodo de manivela, punto celeste: nodo de balancín).

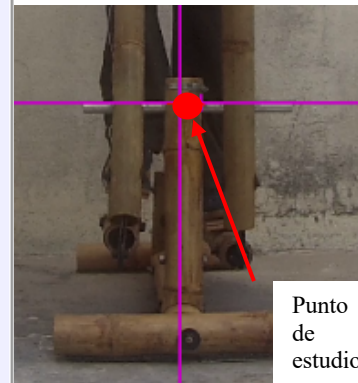
Fuente: Elaboración propia.



Punto de estudio

Figura 46. Análisis del punto medio en el soporte de pies.

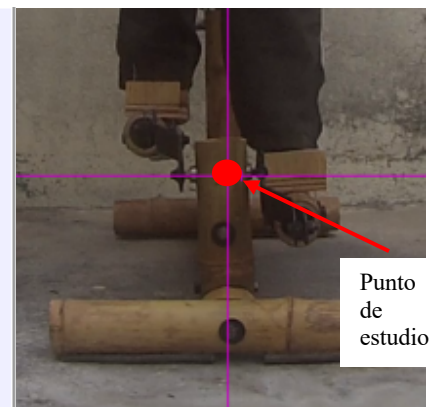
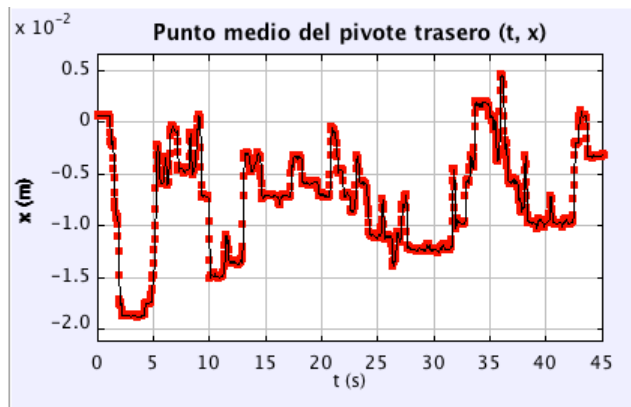
Fuente: Elaboración propia.



Punto de estudio

Figura 47. Gráfica de pivote delantero al ser utilizada por el usuario.

Fuente: Elaboración propia.



Punto de estudio

Figura 48. Grafica de pivote trasero al ser utilizada por el usuario.

Fuente: Elaboración propia.

i. Observaciones

Los balancines topan con los muslos del usuario, al momento que la biela se traslapa con la manivela. El usuario, constantemente, tiene que modificar su posición para realizar el movimiento elíptico. El par de bielas tienen un movimiento de vaivén en el juego que tienen en sus respectivos nodos. Se presentó el mismo sonido que en las pruebas A y B. Al realizar el movimiento elíptico, se puede observar en las Figuras 48 y 49 que el pivote delantero presentó el mayor desplazamiento en el eje “x” en comparación con el eje trasero. Después de realizar la prueba D, se encontraron fallas en la máquina elíptica, que se describen a continuación, (sección I). La estructura del prototipo no se desplazó de su lugar al realizar esta prueba. La posición de los soportes de los pies estaba en una posición que no llegara a impactar con la manivela. Al usar el prototipo se observó que la tuerca en la junta de la manivela y de la biela, de lado derecho del prototipo, estaba en los últimos hilos de la rosca. Esto provocó que la platina, junto al culmo de la biela, se inclinaran hacia un lado. La tuerca no logró mantener su posición (ver Figura 50).

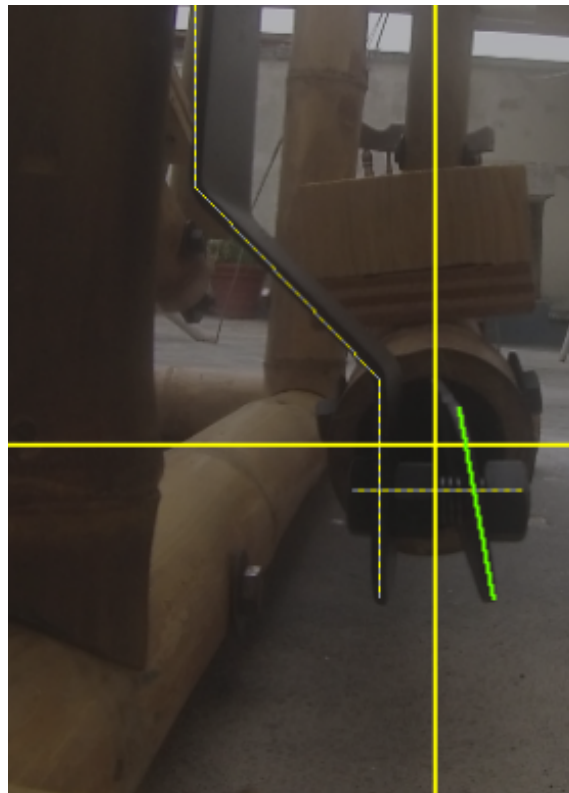


Figura 49. Aflojamiento de tuerca en junta biela-manivela. (segmento verde, platina de biela/ segmento amarillo manivela).

Fuente: Elaboración propia

J. Fallas

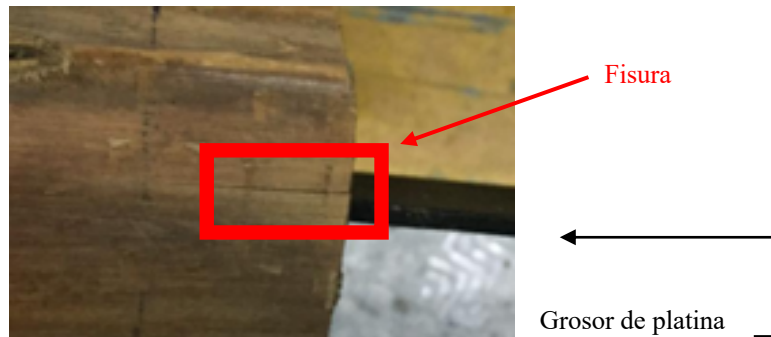


Figura 50. Falla en unión de boca de pescado de pivote delantero.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51, se puede apreciar una fisura en el culmo de la biela derecha. Esta falla es longitudinal al culmo, siguiendo el filo de la platina. Debido a la mínima área de contacto entre la platina (espesor) y la parte interior del culmo se concentraron de esfuerzos provocando un corte en las fibras. Esta falla fue localizada posteriormente a realizar la prueba C. Se debe tomar en cuenta que ciertas fallas pudieron iniciar en la prueba A y B, pero hasta en la prueba C fueron evidentes. Se puede concluir que al ser utilizado el prototipo el esfuerzo de aplastamiento y corte provocaran que estas fisuras se extiendan, siendo necesario replazar el culmo.

En la Figura 52, se puede observar la fisura longitudinal localizada en la boca de pescado del pivote delantero.



Figura 51. Falla pivote delantero.

Fuente: Elaboración propia

Esta falla se puede identificar como una falla de tensión de las fibras, al estar expuesto a esfuerzos de compresión y flexión. La causa puede ser atribuida al desplazamiento del pivote delantero, lo cual provocó que la boca de pescado se fisurarse.

En la Figura 53, se muestra una falla longitudinal en ambos balancines. Acá, se presentó una falla de corte paralelo a las fibras del bambú y se le atribuyó a las platinas que extienden el culmo del balancín. Debido a que las platinas tenían cierto juego, el usuario generó ciclos de impactos en la capa interior del bambú con el filo del espesor, causando la fisura.

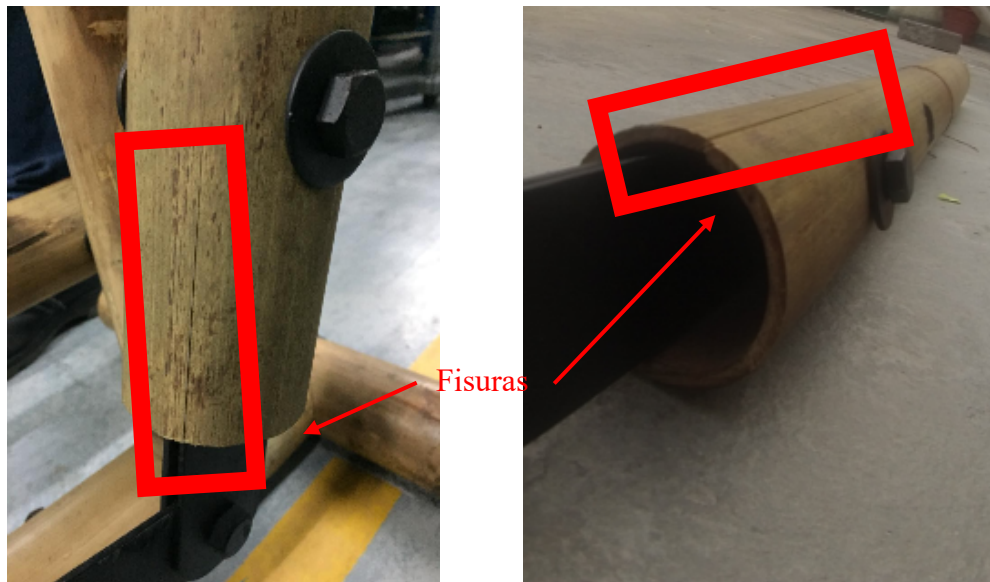


Figura 52. Fisuras en balancines- izquierdo y derecho.

Fuente: Elaboración propia.

K. Observaciones de desalineación de piezas

La Figura 54, muestra cómo ciertas piezas terminaron desalineadas. Previamente, o en la prueba preliminar, se ajustaron ciertas piezas para mejorar el movimiento del prototipo de la máquina elíptica, pero como se puede observar, el problema de alineación persistió aún, después de los ajustes iniciales. Por lo que se determina que es necesario realizar más iteraciones o cambiar el método de manufactura para ciertas partes del prototipo.

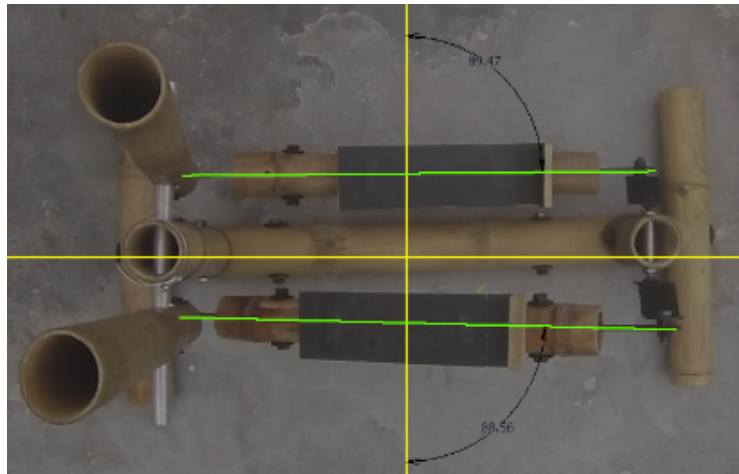


Figura 53. Desalineación de bielas.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 55, se analiza el culmo de bambú y las platinas que conforman la biela y que proveen de los nodos respectivos. Se observa el incumplimiento del requerimiento 3.2.0.g; “El grosor de la platina debe ser colineal con el eje axial del culmo”. Las platinas (color verde) tienen un ángulo con respecto al eje axial del culmo, este ángulo podía llegar a cambiar debido a que no estaba restringida por completo la platina.

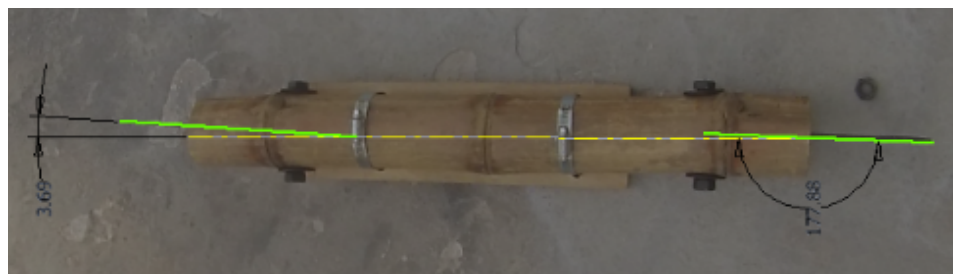


Figura 54. Ejes axiales de platinas con respecto al eje axial del culmo.

Fuente: Elaboración propia.

Se analizó el ángulo entre los ejes axiales de los pivotes (delantero y trasero de la estructura), con respecto al eje axial del tronco de la estructura principal. Al observar la Figura 56, se aprecia el incumplimiento del requerimiento 1.4.1.a “La unión de culmos de bambú

debe estar de forma perpendicular”; debido a que las bocas de pescado no están totalmente perpendiculares con respecto al eje axial del culmo, por lo que no cumplieron el requisito

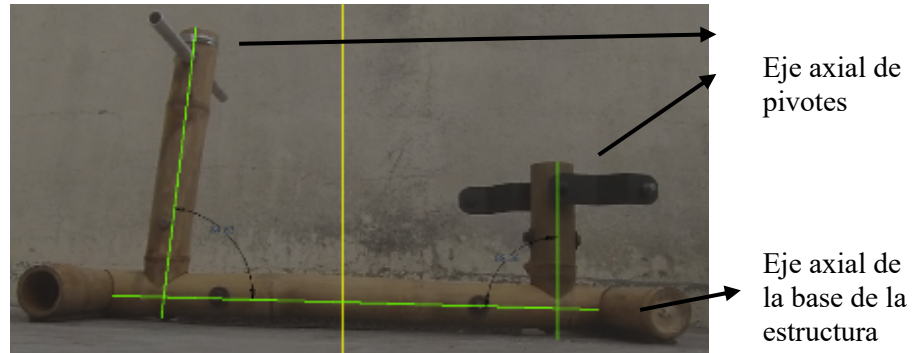


Figura 56. Desalineación de eje axiales de pivotes delantero y traseros con respecto a eje axial del culmo del soporte principal.

Fuente: Elaboración propia.

Este ángulo puede ser atribuido a la forma de la boca de pescado, debido a que no está nivelado en las partes, a través de las cuales se apoya con el tronco de la estructura del soporte principal y al ser tensada la boca de pescado, se acopla de forma irregular. En el proceso de manufactura de las bocas de pescado es vital la nivelación de las partes, con las cuales se acoplará, ya que esto, define la posición del culmo.

En la Figura 58 se observa el incumplimiento de los requerimientos 1.2.0.a; “El agujero para el eje delantero debe estar a 90° con respecto al eje axial del culmo”

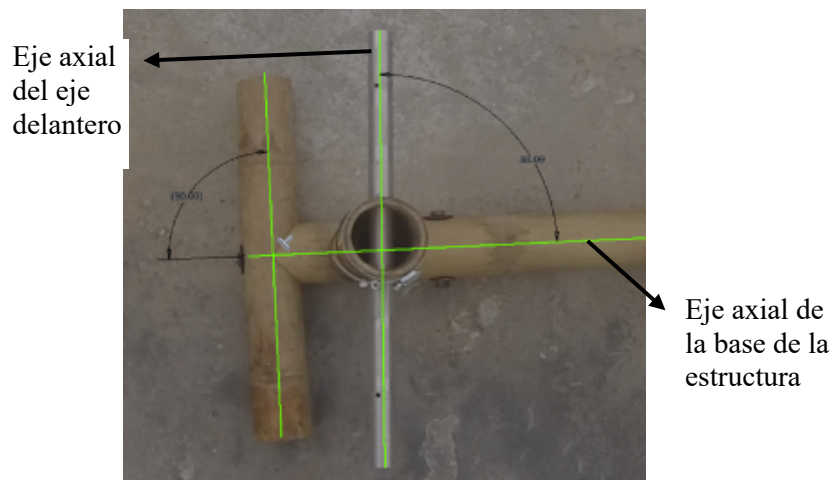


Figura 55. Eje axial de eje delantero con respecto a eje axial de troco de soporte principal.

Fuente: Elaboración propia.

Este ángulo afecta la posición estacionaria de los balancines generando incomodidad al usuario, ya que obliga a que gire su cuerpo para poder sujetarse de los balancines. Esta desalineación proviene del agujero que está en el pivote delantero. Una opción para mejorarlo es realizar la perforación del agujero con el pivote delantero, ya tensionado en la estructura. Debido a la naturaleza del material, el mismo culmo puede presentar ciertas ondulaciones, complicando su alineación respecto del eje axial del culmo.

VI. RESULTADOS

En las Figuras 57 y 58 se muestra la máquina elíptica armada en su totalidad y con sus respectivos soportes de pies, antideslizantes y pasadores de eje delantero.



Figura 56. Prototipo máquina elíptica de bambú, vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 57. Prototipo máquina elíptica de bambú, vista superior.

Fuente: Elaboración propia.

A. Requisitos

Tabla 32. Resultados de requerimientos de soporte principal.

| Resultados de requerimientos de soporte principal | | | |
|--|---|----------|-------------|
| | Soporte principal | Cumplido | No cumplido |
| 1.0.0 | | | |
| 1.0.0.a | La máquina no debe de estar en contacto con el suelo. | X | |
| 1.0.0.b | La estructura no se debe desplazar de su posición. | | X |
| 1.1.0 | Base de soporte principal pieza de bambú | | |
| 1.1.0.a | Los agujeros en serie tienen que estar separados por un nudo. | X | |
| 1.1.0.b | El eje axial de los agujeros de los pivotes debe estar a 90° con el eje axial de los pernos tensores. | | X |
| 1.1.0.c | Los ejes axiales de los agujeros de los pernos tensores y los ejes axiales de los pivotes tienen que estar a 90 grados. | X | |
| 1.2.0 | Pivote delantero | | |
| 1.2.0.a | El agujero para el eje delantero debe estar a 90° con respecto al eje axial del culmo. | | X |
| 1.2.0.b | El nudo debe estar a un rango 6.00 cm de la boca de pescado. | X | |
| 1.2.0.c | Los pernos deben estar a una distancia de 6.00 cm de un nudo. | X | |
| 1.2.1 | Pivote trasero | | |
| 1.2.1.a | El agujero para el eje trasero tiene que estar a 90° con respecto al eje axial del culmo. | X | |
| 1.3.0 | Soportes laterales | | |
| 1.3.0.a | El eje axial del culmo debe estar a 90° del eje axial de la varilla roscada . | X | |
| 1.4.0 | Uniones para estructura de soporte principal | | |
| 1.4.0.a | Las uniones deben mantener su posición fija, al ser utilizado la máquina. | | X |
| 1.4.0.b | Se debe poder desmantelamiento las uniones | X | |
| 1.4.1 | Unión de Bambú / bocas de pescado | | |
| 1.4.1.a | La unión de culmos de bambú debe de estar de forma perpendicular. | | X |
| 1.4.1.b | La boca de pescado debe estar a un rango de 6.00 cm de un nudo. | X | |
| 1.4.1.c | El agujero de perno debe estar a un rango de 6.00 cm de un nudo. | X | |
| 1.4.2 | Perno tensor / Unión para ajuste | | |
| 1.4.2.a | Unión de boca de pescado debe estar en posición de diseño. | X | |
| 1.4.2.b | Se debe restringir el desplazamiento de la boca de pescado. | | X |
| 1.4.2.c | Se debe poder realizar un ajuste fino a la precarga. | X | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Resultados de requerimientos de ejes.

| Resultados de requerimientos de ejes. | | | |
|--|--|----------|-------------|
| 2.0.0 | Ejes | Cumplido | No cumplido |
| 2.0.0.a | El eje no debe desplazarse . | X | |
| 2.1.0 | Eje delantero | | |
| 2.1.0.a | El eje axial debe estar perpendicular respecto al eje axial del culmo del pivote delantero | | X |
| 2.1.0.b | Se debe poder desmantelar el eje. | X | |
| 2.1.0.c | Los pasadores deben restringen el desplazamiento del eje. | X | |
| 2.2.0 | Eje trasero | | |
| 2.2.0.a | El eje axial del eje trasero debe de estar perpendicular respecto al eje axial del culmo . | X | |
| 2.2.0.b | Se debe poder desmantelar el sistema del eje trasero. | | X |
| 2.2.1 | Eje trasero | | |
| 2.2.1.a | Debe haber igualdad entre el diámetro del eje trasero y el diámetro del nodo de la platina de la manivela . | X | |
| 2.2.1.b | Se debe poder desarmar el eje trasero . | | X |
| 2.2.1.c | El eje trasero debe de rotar libremente. | X | |
| 2.2.2 | Eje secundario | | |
| 2.2.2.a | Dimensiones deben coincidir con los cojinetes y el eje trasero. | X | |
| 2.2.2.b | Debe haber un ajuste de interferencia del eje con el agujero del pivote trasero. | X | |
| 2.2.2.c | El eje debe de estar fijo. | X | |
| 2.2.2.d | Se debe poder desmantelar el eje secundario. | | X |
| 2.2.3 | Cojinetes | | |
| 2.2.3.a | Las dimensiones de diámetro exterior y diámetro interior deben coincidir con las dimensiones del eje secundario. | X | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Resultados de requerimientos de mecanismo de 4 barras.

| Resultados de requerimientos de mecanismo de 4 barras. | | | |
|---|---|----------|-------------|
| 3.0.0 | Mecanismo de 4 barras | Cumplido | No cumplido |
| 3.0.0.a | El prototipo debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del mecanismo de 4 barras de diseño. | X | |
| 3.0.0.b | La dimensión de la bancada debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del diseño de plano. | X | |
| 3.1.0 | Juntas | | |
| 3.1.0.a | Las juntas entre el eslabón de biela y balancines deben ser doble voladizo. | X | |
| 3.1.0.b | Las juntas entre el eslabón biela y manivela deben ser voladizo. | X | |
| 3.1.0.c | Se debe poder desmantelar juntas. | X | |
| 3.1.1.b | Las platinas proveen el agujero para ser el nodo del eslabón. | X | |

Fuente: Elaboración propia.

| Continuación de resultados de requerimientos de mecanismo de 4 barras. | | | |
|---|---|-----------------|--------------------|
| | Platinas | Cumplido | No cumplido |
| 3.1.1 | | | |
| 3.1.1.a | La platina debe extender el culmo (culmo+platina=eslabón). | X | |
| 3.1.1.b | Las platinas proveen el agujero para ser el nodo del eslabón. | X | |
| 3.1.2 | Perno tensor | | |
| 3.1.2.a | Debe evitar desplazamiento de la platina. | | X |
| 3.1.2.b | El perno tensor debe coincidir con la dimensión del agujero de la platina. | X | |
| 3.1.2.c | Se debe poder desmantelar mecanismo de 4 barras. | X | |
| 3.2.0 | Biela | | |
| 3.2.0.a | Eslabón (culmo+platina) debe estar en una tolerancia de +/-2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras. | X | |
| 3.2.0.b | Los centros de los agujeros de las platinas y eje axial del culmo deben ser colineales. | | X |
| 3.2.0.c | El agujero para el perno tiene que estar en un rango de 6.00 cm de un nudo. | X | |
| 3.2.0.d | Agujeros en serie deben estar separados por 1 nudo. | X | |
| 3.2.0.e | El grosor de la platina debe ser colineal con el eje axial del culmo. | | X |
| 3.2.0.f | El diámetro interior del culmo debe permitir que la platina entre dentro del culmo. | X | |
| 3.2.0.g | Un nudo debe estar en medio del culmo. | X | |
| 3.2.2 | Soporte de pies | | |
| 3.2.2.a | Debe haber tener un antideslizante en los soportes de los pies. | X | |
| 3.2.2.b | Los soportes de los pies deben mantenerse en posición fija al utilizarse la máquina. | X | |
| 3.3.0 | Manivela | | |
| 3.3.0.a | El nodo compartido con biela debe girar 360° con respecto al eje trasero. | X | |
| 3.3.0.b | Las manivelas tienen que mantener un ángulo de 180° entre ellas. | X | |
| 3.3.0.c | La manivela debe permitir desmantelarse. | | X |
| 3.3.0.d | El eslabón debe estar en una tolerancia de +/-2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras de diseño. | X | |

Fuente: Elaboración propia.

| Continuación de resultados de requerimientos de mecanismo de 4 barras. | | | |
|---|---|----------|-------------|
| 3.4.0 | Balancín | Cumplido | No cumplido |
| 3.4.0.a | La junta con biela debe de dar un movimiento oscilatorio al ser utilizada la máquina. | X | |
| 3.4.0.b | El perno y el eje delantero deben estar colineales al eje axial del culmo. | | |
| 3.4.0.c | El eslabón (culmo+platina) tienen estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm con respecto a la dimensión del mecanismo de 4 barras. | X | |
| 3.4.0.d | Tiene que haber una diferencia entre par de eslabones de 3.00 +/- cm. | X | |

Fuente: Elaboración propia.

B. Costo de materiales

Tabla 35. Costos de materiales en quetzales.

| Costos de materiales en quetzales | | | |
|---|----------|----------------|-------------|
| Elemento | Cantidad | Costo unitario | Costo total |
| <i>G. Angustifolia, G. Verticillata, D. Asper</i> 12 metros lineales. | 8 | 56.25 | 450.00 |
| Lámina de acero negro caliente 3 x 3 pies | 1 | 228.90 | 228.90 |
| Varilla roscada ½ pulgada | 2 | 24.50 | 49.00 |
| Arandelas ½ pulgada | 24 | 0.45 | 10.80 |
| Tornillos de ½ pulgada. Longitud: 3 ½ pulgadas. | 2 | 3.25 | 6.50 |
| Tornillo de ½ pulgada. Longitud 4 pulgadas | 8 | 3.25 | 26.00 |
| Pliego de antidespilante | 1 | 60.00 | 60.00 |
| Pegamento de contacto | 1 | 15.00 | 15.00 |
| Madera | 1 | 20.00 | 20.00 |
| Rodamientos de bolas | 2 | 55.00 | 110.00 |
| Tuercas de ½ pulgada. | 20 | 1.00 | 20.00 |
| Tubo de 1 pulgada aluminio 1440 | 1 | 30.00 | 30.00 |
| Barra de acero Longitud 2 pies | 1 | 60.00 | 60.00 |
| Barra de acero. 1 pulgada Longitud 4 pulgadas. | 1 | 20.00 | 30.00 |
| Lija grado 60 | 1 | 1.50 | 1.50 |
| Tornillo de ½ pulgada. Longitud 1 ½ pulgada. | 2 | 2.25 | 4.50 |
| Tuerca de ¼ pulgada. | 12 | .5 | 6.00 |
| Abrazaderas | 4 | 4.90 | 19.60 |
| Tornillos de ¼ pulgada. | 6 | 1 | 6.00 |
| Rodamientos | 2 | 55 | 110.00 |
| Total | | | Q1,263.8 |

Fuente: Elaboración propia.

C. Dimensiones finales del mecanismo

Tabla 36. Comparación de dimensiones del mecanismo de 4 barras.

| Comparación de dimensiones del mecanismo de 4 barras | | | |
|--|----------|----------|------------|
| | Real | Diseño | Diferencia |
| Biela | 76.00 cm | 76.10 cm | 0.10 cm |
| Manivela | 14.00 cm | 14.52 cm | 0.52 cm |
| Balancín | 32.50 cm | 32.63 cm | 0.13 cm |
| Bancada | 73.50 cm | 74.13 cm | 0.63 cm |

Fuente: Elaboración propia.

Con las diferencias de dimensiones registradas en la Tabla 36, los requerimientos 3.0.0.a; “El prototipo debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del mecanismo de 4 barras de diseño” y 3.0.0.b “La dimensión de la bancada debe estar en una tolerancia de +/- 2.00 cm del diseño de plano”. Cumplen al no diferir más de 2 cm del diseño del mecanismo de 4 barras; lo cual fue prioridad al manufacturar el prototipo. Al lograr cumplir este requerimiento, se cumple con el objetivo que la máquina provea el movimiento elíptico esperado por el diseño. En la Tabla 37, se registró el tipo de bambú utilizado para cada pieza.

Tabla 37. Iteraciones de bambú.

| Iteraciones de bambú. | | | |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | Iteración 1 | Iteración 2 | Iteración 3 |
| Balancín | | | |
| Derecho | <i>G. Verticillata</i> B, 2-3 | <i>G. Verticillata</i> C, 4-5 | <i>G. Verticillata</i> A, 1-2 |
| Izquierdo | <i>G. Verticillata</i> B, 4-5 | <i>G. Verticillata</i> A, 3-4 | |
| Biela | | | |
| Derecho | <i>G. Angustifolia</i> C, 6-9 | | |
| Izquierdo | <i>G. Angustifolia</i> C, 9-12 | | |
| Pivote trasero | <i>G. Angustifolia</i> A, 4-6 | <i>D. Asper</i> B, 1-2 | |
| Soporte lateral trasero | <i>G. Angustifolia</i> B, 6-7 | <i>G. Angustifolia</i> A, 12-10 | |
| Soporte lateral delantero | <i>G. Angustifolia</i> B, 8-10 | | |
| Tronco | <i>G. Angustifolia</i> B, 1-5 | | |

Fuente: Elaboración propia.

D. Discusión de resultados

Para la manufactura de la máquina elíptica, se invirtió un tiempo de 336 horas, tiempo que fue distribuido en la ejecución de pruebas iniciales, pruebas finales y el tiempo dedicado al conocimiento del bambú. En la Tabla 37, se puede observar las distintas iteraciones de las piezas de bambú cada una con distinta causa (prueba o falla), con el fin de modificar y ajustar en relación con los requisitos exigidos para la construcción del prototipo la máquina elíptica según el diseño. Para realizar proyectos utilizando el bambú, como material alternativo, es importante tomar en cuenta que se deberán descartar ciertos culmos, debido a causas externas que no se pueden controlar; por ejemplo, secamiento acelerado, humedad en el ambiente y manipulación de los culmos. En la Tabla 35, se muestran los costos que se cubrieron para la manufactura del prototipo, que tuvo un costo total de Q.1,263.80.

Es significativo señalar, que siendo el prototipo una estructura de bambú, requiere de un mantenimiento periódico, que evalué la integridad. Debido a los resultados de la prueba final, se demuestra que es necesario un mantenimiento posterior inmediato a su uso, ya que las piezas tienden a aflojarse o fisurarse

Para manufacturar los componentes del mecanismo de 4 barras fue necesario usar maquinaria de un taller de metalmecánica como: el equipo para soldar, la cortadora de plasma, el taladro de mesa y el torno. Las bocas de pescado fueron elaboradas manualmente con lima y formón, lo cual impacta en cuanto al tiempo que se invirtió en manufacturar cada pieza. Una opción sería utilizar herramientas mecánicas para agilizar el proceso; por ejemplo sierras de mesa y sierra caladora. Para tener acoples entre culmos precisos se debe contar con una mano de obra experimentada. Para las partes que no son de material de bambú fue necesario el uso de máquinas y herramientas como: el torno, la fresadora y cortadora de plasma para poder obtener las piezas necesarias.

Al trabajar con el bambú en la manufactura de este prototipo, el mayor problema que se presentó fue la alineación entre componentes. Esto se observa en las uniones entre bambú o uniones entre bambú y platinas. Lo anterior, debido a la ondulación del bambú, ya que se presentan complicaciones al querer alcanzar la precisión con respecto al eje axial del culmo.

Al observar los resultados de la prueba C, se concluye que se logró manufacturar un prototipo de máquina elíptica, en la cual su manivela presenta una rotación de 360 grados, con respecto a su eje; el nodo del balancín da un movimiento oscilatorio de vaivén y el punto

medio del pie del usuario exhibe un movimiento de zancada. La máquina presentó dos problemas: uno de rigidez de uniones y otro de alineación de piezas. La prueba A y B muestra la incapacidad de mantener una posición fija del pivote delantero y trasero al momento que el usuario utilizará el prototipo.

Se debe considerar que, el no usar mortero para fijar las posiciones de las platinas, provocó a que presentara una desalineación excesiva. El no usar mortero para rellenar los culmos de bambú no interfirió con el cumplimiento del movimiento elíptico del prototipo, sin embargo, la interacción usuario-máquina se vio afectada exigiendo que el usuario variara su fuerza y su posición constantemente, para poder utilizar la máquina elíptica.

El tomar la decisión de hacer un solo agujero para las platinas, que funcionan como extensiones de los eslabones, provocó que la platina tuviera una mayor libertad de desplazamiento. Este ajuste permitió resguardar la integridad del bambú, al ser perforado tan cercano un agujero del otro y en serie. Esta acción repercutió en que la máquina tuviera cierta rigidez en su posición de diseño.

Al observar los resultados de la prueba A y B, se puede llegar a concluir que la máquina no alcanzó a proveer rigidez, resultando que la interacción del usuario-máquina fuera afectada por dos variables principales: la rigidez de las uniones y la alineación de los componentes. A continuación, se discutirá la influencia del proceso de manufactura en estas dos variables

Al principio, no se logró manufacturar la pieza de 45 grados y ponerla en la posición definida por el diseño. Se presentó la dificultad de crear una boca de pescado de 45 grados con formón y martillo, que permitiera el acople entre culmos, y mantuviera las dimensiones de diseño, respetando la norma E.100 de Perú. Dado los resultados de las pruebas A, B y C se concluye que existe una falta de rigidez del pivote delantero y trasero. La pieza de 45 grados estaría en conexión con la base de la estructura y el pivote delantero. Se puede debatir que la pieza de 45 grados hubiera proporcionado una mayor rigidez, disminuyendo el desplazamiento del eje axial de pivote delantero, al ser utilizado por un usuario.

El pivote delantero no logró mantener su posición, presentando constantemente desalineación. Al realizar las bocas de pescado de esta pieza, se buscó que el acople estuviera nivelado, como se puede observar en la Figura 56; pero después de 2 iteraciones, se presentan ángulos de 84° y 88° del pivote delantero y del pivote trasero, respectivamente, con respecto al eje axial del culmo de la base de la estructura. Para estas uniones es necesario practicar el proceso de manufactura, para remover el menor material y poder realizar la unión con un acople entre piezas que permita un ángulo más cercano a 90° entre culmos. La desalineación del eje delantero provino del agujero en el pivote delantero, esta desalineación ocurrió al momento de alinear el eje axial del culmo con el eje axial de la broca.

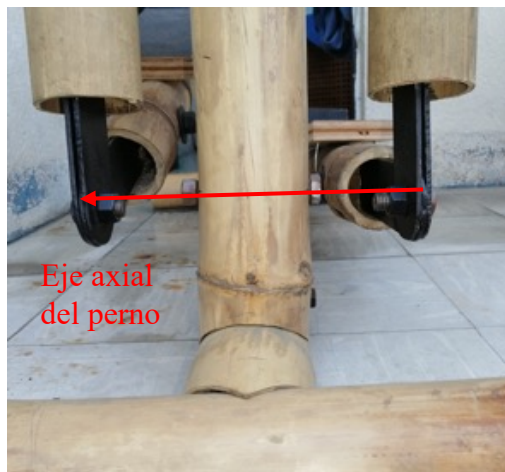


Figura 59. Vista frontal del pivote delantero. (Eje axial del perno intercepta el eje axial de la base).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 58. Vista frontal del pivote trasero. (Eje axial del perno paralelo al eje axial de la base).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las pruebas nos indica que el pivote delantero presento mayor desplazamiento que el trasero en el eje x en una vista frontal. Este resultado se le atribuye a la posición del eje axial del perno tensor con la dirección de la fuerza aplicada. En la Figura 60 se muestra como el eje axial del perno tensor delantero y de la base del soporte principal se intersectan. En la Figura 61 se muestra como el eje axial del perno tensor trasero este paralelo con el eje axial de la base del soporte principal. En la Figura 62 se muestra como esta compuesto el sistema de perno tensor el cual esta dentro de los culmos en las Figuras 60 y 61 . Debido a la configuración del perno tensor el block que transmite la tensión es libre de trasladarse a lo largo del perno tensor en el momento que el culmo es aplicado fuerzas paralelas al eje axial del perno tensor. Para ampliar los resultados del desplazamiento de los pivotes se debe evaluar tanto de vista frontal como de vista lateral.

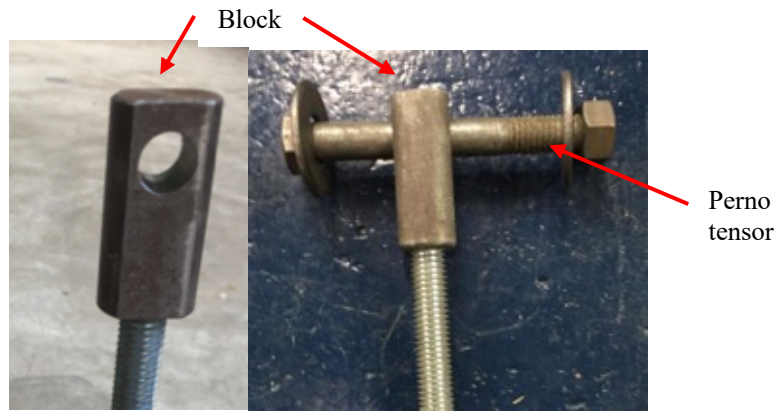


Figura 60. Componentes de perno tensor.

Fuente: Elaboración propia.

Las uniones de boca pescado se vieron afectadas debido a que no se tenía el proceso de manufactura adecuado para la revisión de las bocas de pescado. Esto provocó que las piezas no estuvieran perpendiculares entre sí, perjudicando la alineación de toda la máquina elíptica.

a. Discusión de fallas del bambú

Las fallas que se presentaron en el mecanismo de 4 barras fueron internas, provocadas principalmente, por el grosor de las platinas; esta falla de corte longitudinal es una debilidad del bambú, como fue presentado por Janssen (1981). Esta falla se presentó en las especies de *G. Angustifolia* y *G. Verticillata*. Es de destacar que en los balancines se presentó un impacto cíclico de las platinas, al llegar a posiciones extendidas, al ser utilizado. Mientras que, en el caso del eslabón biela, debido al diámetro interno del culmo, las platinas tenían una mayor interferencia evitando que hubiera un mayor impacto pero se presentaron esfuerzos de aplastamiento y corte. Se puede concluir que al ser más utilizadas, el esfuerzo de corte y aplastamiento provocado en el grosor de las platinas causó que estas fisuras se extendiesen, siendo necesario remplazar el culmo.

La falla en el pivote delantero, siendo una falla paralela a la fibra del culmo, en el borde de la boca de pescado, se atribuye a la libertad de desplazamiento del pivote delantero, provocando que se fisurase. Se puede, igualmente, atribuir que los bordes de las bocas de pescado tenían menos material, volviéndose más frágiles.

Las fallas presentadas nos dan un punto para evaluar la capacidad del culmo de bambú como elemento de un mecanismo de 4 barras, exponiendo el culmo a un sistema dinámico. El usar el culmo demandó realizar revisiones periódicas después de su uso y verificando el estado de la pieza. Esto impactó en la necesidad de cambiar de piezas cuando estas presentaran fisuras que comprometieran la seguridad del usuario. El bambú, aun presenta la disponibilidad de usarlo en piezas hechas por sus fibras, obteniendo piezas con geometrías distintas al de un culmo. Estas geometrías expanden los distintos tipos de uniones que se puedan utilizar. Se considera que se debe profundizar en el desarrollo de utilizar el bambú en sistemas dinámicos en diferentes formas al culmo de bambú.

b. Discusión de juntas y uniones

Las uniones del prototipo tenían distintas funciones, con el objetivo de unir los componentes y mantenerlos en su posición. En la estructura del soporte principal, el sistema empleado fue de una unión de boca de pescado con el perno tensor. La boca de pescado para los culmos, al ser manufacturadas, cumplieron dos requerimientos establecidos, pero, errando en poder mantener su posición respecto una de la otra. El objetivo principal de éstas fue unir los culmos de bambú y dejarlas en su posición, con respecto a los otros culmos. Sin embargo, se logró manufacturar las piezas, pero no que cumplieran su función de mantener los componentes en su posición de diseño. Adjunto a las uniones de boca de pescado estaban los pernos tensores, cuya función era mantener la posición de las bocas de pescado, una con respecto al otra. Por lo que se pensó que serían suficientes para mantener la rigidez, pero el movimiento presentado por la estructura demostró lo contrario. Las bocas de pescado, al tener un área de contacto con irregularidades, pierden su ajuste, fundamentalmente, al ser sometidas a esfuerzos de torsión y flexión, lo cual ocurrió al utilizar el prototipo. Sin embargo, el sistema de perno tensor, dependiendo de la dirección de la fuerza permitiría el movimiento de la boca de pescado en el culmo de bambú.

Para el mecanismo de 4 barras, la extensión de las platinas metálicas, dentro del culmo de bambú, para crear un componente “eslabón”, permitió el ensamble de eslabones, generando un mecanismo de 4 barras, el cual realizó el movimiento teórico. Este sistema de platinas al principio generó mayor fricción de lo esperado, pero fue claro que dicha fricción ocurrió, debido al desalineamiento de los pernos que fijaban las platinas. Por lo que en todo el proyecto se presentó dificultad en referencia al eje axial, para definir puntos de perforación; lo cual, se ajustó al realizar iteraciones de las piezas. Así mismo, el mecanismo

de 4 barras falló en proveer rigidez, provocando que el grosor de las platinas causara una fatiga en la parte interior del culmo de bambú, concentrando esfuerzos en una definida un área. Esta fatiga llevó a las fallas en los culmos.

Para prevenir las fisuras que se presentaron en el mecanismo de 4 barras, se propone utilizar un perfil cilíndrico en vez de usar las platinas de dimensiones de 228.6 mm x 50.8 mm con un espesor de 3.175 mm como extensión del culmo. Esta acción amplía el área de contacto de la unión al interior del culmo disminuyendo el esfuerzo en el bambú. Sin embargo, esto implica que la manufactura de la pieza no es posible estandarizarla debido a los diferentes diámetros internos a lo largo del culmo. Los requisitos de las uniones vendrán dependientes a la forma del bambú en el mecanismo.

VIII. CONCLUSIONES

1. Se concretó el proceso de manufactura del prototipo de una máquina elíptica hecha de bambú, el cual cumple con la norma técnica del ministerio de Perú E.100 para la selección del bambú elaborada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
2. Se alcanzó a seleccionar el material adecuado permitiendo la manufactura del prototipo, siendo este: *Dendrocalamus Asper* para el pivote trasero; *Guadua Angustifolia* para el tronco, soportes laterales, pivote delantero y bielas; *Verticillata willdenow* para los balancines.
3. Se identifica que las propiedades principales del bambú en forma de culmo es el soportar su propio peso y cargas laterales. Lo que diferencia su capacidad entre especies es la composición física del bambú. Para el presente trabajo se utilizaron 12 metros lineales de culmo de bambú seco de diámetros exteriores entre 64 a 84 mm, 4 metros por cada especie. La especie *Dendrocalamus Asper* utilizada presentó una cantidad entre 5 a 7 entrenudos con espesores de pared de 8 a 9 mm. La *Guadua Angustifolia* presentó 11 a 12 secciones de entrenudos con espesores de pared entre 8 a 10 mm. Siendo la *Guadua Angustifolia* y *Dendrocalamus Asper* las de mayor densidad a comparación de la *Verticillata willdenow* la cual presentó una cantidad de 5 entrenudos, con espesores de pared entre 4 a 5 mm.
4. Todas las piezas de bambú se manufacturaron de acuerdo con la norma técnica de Perú E.100. La elaboración del soporte de 45° de la estructura principal fue removida del diseño debido a su posición de acoplamiento de su respectivo plano el cual era afectado por las distancias entre nudos.
5. Se alcanzó el desplazamiento teórico del mecanismo de 4 barras manivela-balancín con la implementación de platinas de acero negro en caliente de dimensiones de 228.6 mm x 50.8 mm con un espesor de 3.175 mm como extensión del culmo de bambú para generar el eslabón.
6. El espesor de las platinas implementadas como extensión del culmo provocó una concentración de esfuerzos en la cara interior del culmo originando fisuras paralelas a las fibras del culmo de bambú.
7. Se concluye que el proceso de remoción de material empleado durante la manufactura de las bocas de pescado para la unión entre culmos de bambú, provoca

desalineamiento de las piezas que constituyen el prototipo el cual incide directamente en el acople entre los culmos.

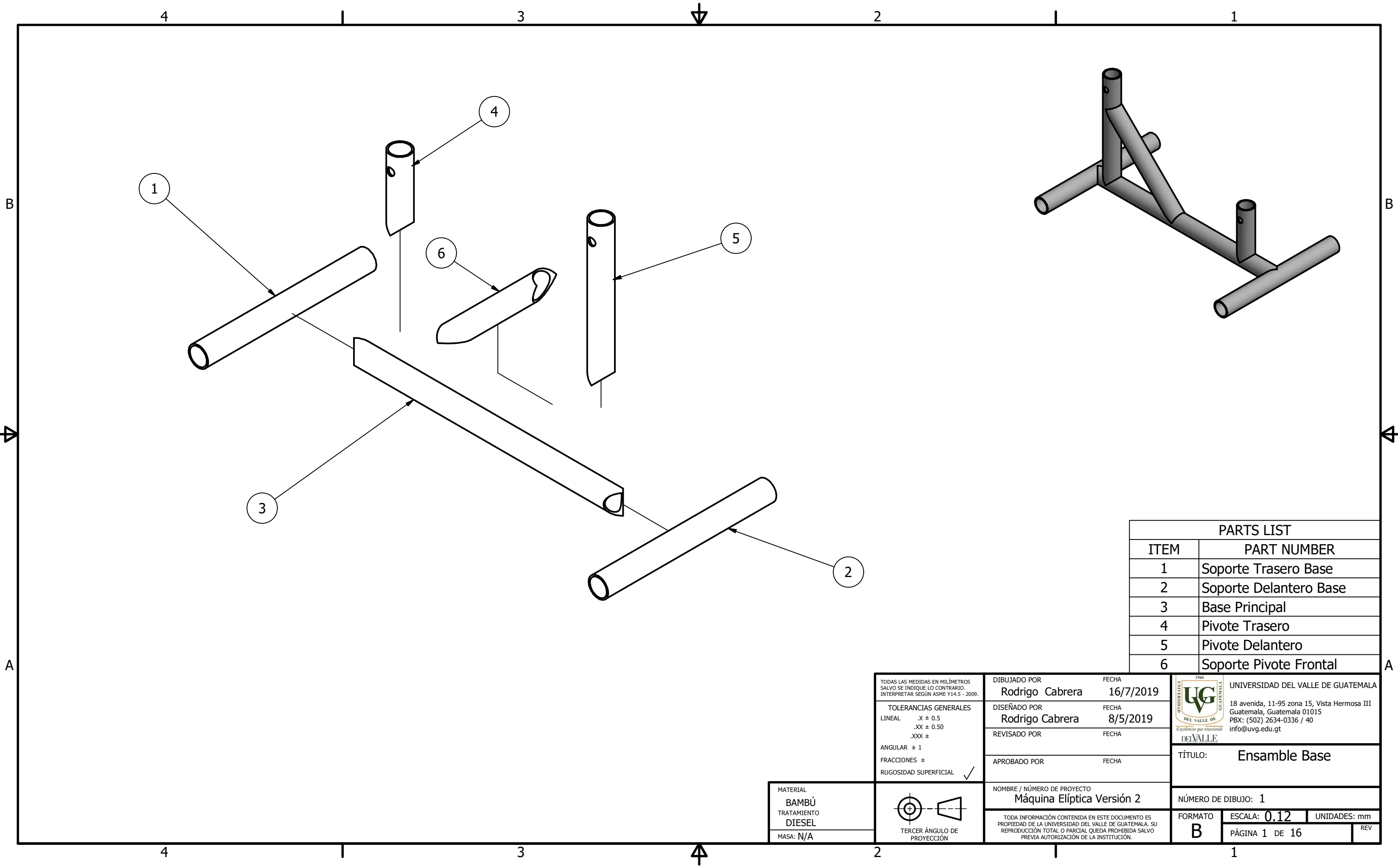
8. Se concluye que las propiedades físicas del bambú varían considerablemente durante la preparación de los culmos de bambú en el proceso de secado. Este proceso debe de ser constantemente evaluado, debido al impacto en influir en la integridad del bambú.
9. Debido a la falta de rigidez entre los acoples del pivote delantero con la base del soporte y pivote trasero con la base del soporte principal; al ser complementados solo por un sistema de perno tensor presenta inestabilidad.
10. El eje axial del perno comparte su eje axial con el agujero del block utilizado para el sistema perno tensor. Este agujero restringe el desplazamiento radial del perno al ser tensionado, pero al tener fuerzas axiales el perno es libre de desplazarse. El pivote trasero tuvo menor desplazamiento que el pivote delantero en las pruebas realizadas. Se concluye que debido a que el eje axial del perno tensor está paralelo con respecto al eje axial de la base el pivote trasero presentó menor desplazamiento a comparación del pivote delantero.
11. El costo del prototipo de la máquina elíptica de bambú es de Q1,263.80.

VIII. RECOMENDACIONES



1. Con el fin de seleccionar los culmos más adecuados, sería ideal visitar el lugar de cosecha para escogerlos directamente.
2. Se recomienda que las condiciones del almacenaje del bambú cuenten con control de humedad y aireación para reducir el efecto de estos aspectos en la variación de sus dimensiones.
3. Al perforar los culmos, se sugiere poner cinta adhesiva en la otra cara exterior del culmo para evitar el desgarre de las fibras.
4. Debido a la propiedad física del diámetro del culmo el cual varía a lo largo de su altura, el proceso de manufactura de bocas de pescado debe ser específico en las secciones del culmo que se utilizarán para el acople ya que no se puede estandarizar una medida para toda unión.
5. Se recomienda revisar el afilado de las herramientas para corte o perforación del bambú previo a su utilización.
6. Se deben sujetar los culmos por las caras al momento de ser perforados para evitar la pérdida de alineación.
7. Se recomienda practicar el proceso de elaboración de las bocas de pescado en el bambú para desarrollar la calidad del acople entre las piezas.
8. Utilizar uniones de boca de pescado únicamente complementadas con un perno tensor, como sistema de unión entre culmos de bambú, no es adecuado debido a su debilidad al ser sometidas a cargas de torsión.
9. Las propiedades físicas del bambú varían considerablemente durante la preparación de los culmos de bambú en el proceso de secado. Este proceso debe de ser constantemente evaluado, debido al impacto en influir en la integridad del bambú.
10. Para evitar el desalineamiento entre los componentes, se requiere la colinealidad del punto de perforación al eje axial del culmo.

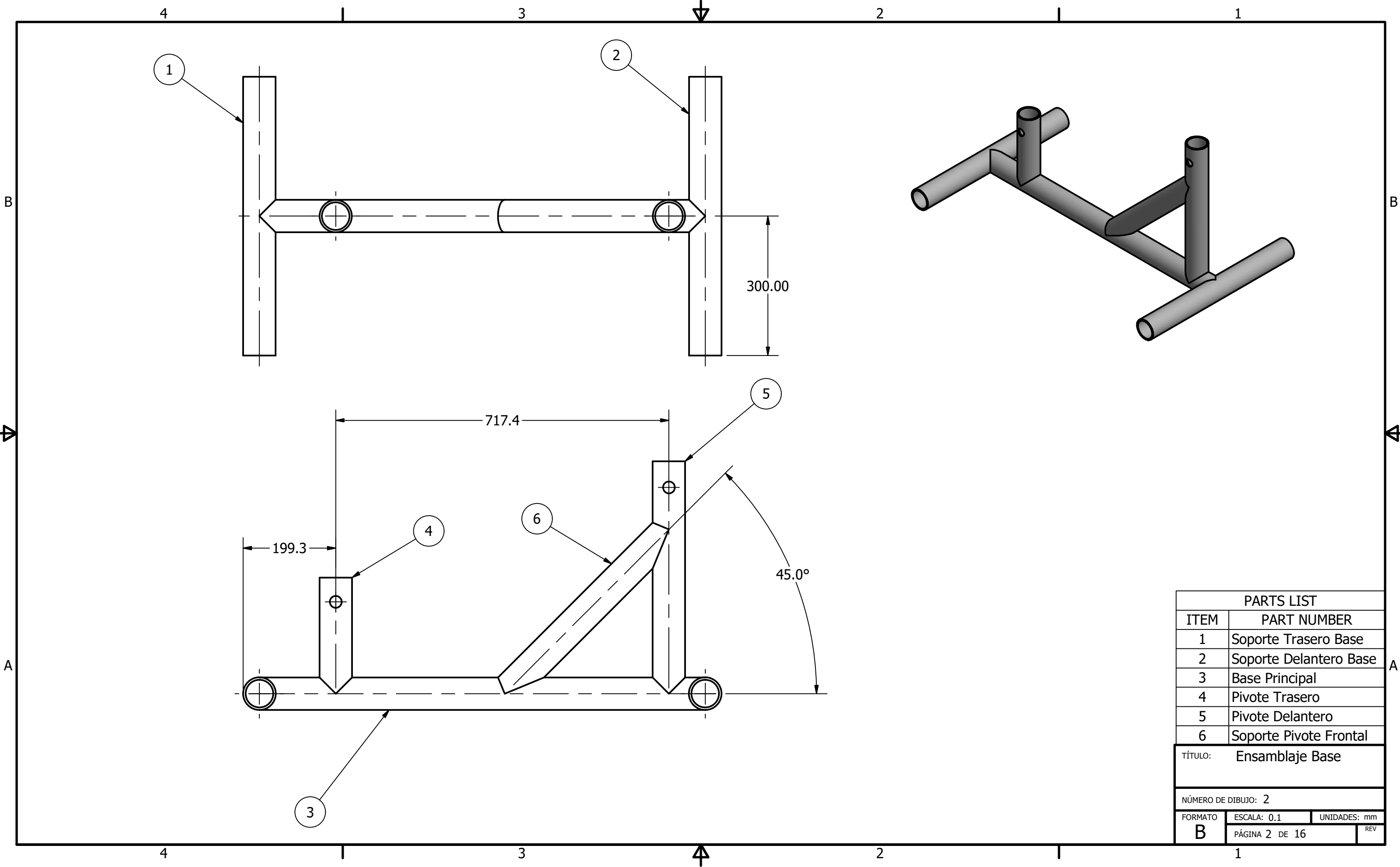
IX. BIBLIOGRAFIA

- Amada, S. M. (1996). The mechanical Structures of Bamboo in Viewpoint of Functionally Gradiante and Composite Materials,. *Journal of Composite Materials*, 800-819.
- Arce-Villalobos, O. (1993). *Fundamental of the design of bamboo structures*. Eindhoven Netherlands: University of Technology.
- Calo Rosales, N. E. (2018). *Caracterizacion fisica y mecanica de tres especies de bambu aptas para la construccion en Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chapman, G. (1996). *The biology of Grasses*. Wallingford: CAB International .
- Chapman, G. P. (1992). *An introduction to the grasses*. Wallingford: CAB International .
- Indiamart. (12 de febrero de 2019). *Indiamart*. Obtenido de <https://www.indiamart.com/proddetail/elliptical-cross-trainer-home-use-20041637212.html>
- Ministerio de Agricultura Ganadera y Alimentacion, M. (2014). *Industrializacion del bambu en Guatemala*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.
- Richard, M. (2013). *Assesing the performanceof bamboo structural components*. Pittsburg: University of Pittsburg.
- Jayanetti, D. a. (2008). *Bambo in construccion. Mpdern Bamboo Structures*. London: XIA Y, Inoue M.
- Janssen, J. (2008). *Designing and Building wiht Bamboo*. INBAR . Beijing: International Network fro bamboo and rattan .
- Ubidia, J. (2015). *Construir con bambu. Manual de contruccion* . Peru : Red internacional de bambu y ratan INBAR.
- Shyun lin Shin. Valdez Cancinos, D. (2010). *Guia para la produccion, manejo post cosecha y usos del bambu Dedrocalum Asper, con enfasis en la construccion. Experiencia en Guatemala*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.
- Tejada Vasque, J. h. (1990). *Determinacion de las propiedades fisicas y mecanicas de cuatro especies de bambu*. Guatemala: Universidad de San Carlos .
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria* . Ciudad de Mexico : Mc Graw Hill .
- Janssen, J. J. (1981). *Bamboo in Building Structures*. Eindhoven: Eindhoven:Techinshe Hogeschool Eindhoven DOI .
- Jaramillo, Á. A. (agosto de 2016). Revisión de la norma ISO-N314-22157 para estandarizar los ensayos de compresión paralela en la guadua angustifolia Kunth. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 56-63.
- Fazita, M. N. (2016). *Green composites made of bamboo fabric and poly(lactic) acid for packaging application- A review*. Penang: University Sains Malaysia .
- Liese, W. (1998). The anatomy of bamboo culms. *INBAR Technical Report No. 18 International Network for Bamboo and Rattan*, 204.
- Osorio, L., Trujillo, E., Van Vuure, A. W., & Verpoest, I. (2011). Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/ epoxy composites. *Reinforced Plastcis & Composites* , 396-407.
- Lin, S.-S. (2010). *Fabricacion de muebles en Bambu*. Guatemala: ICTA.
- M, A., Delgado, L. F., Giron, E. R., Jerez, E. M., Martinez del Rosal , A., Paredes , A. L., . . . Schambach, O. B. (28 de Noviembre de 2008). El bambu como elemento estructural . *El bambú como elemento estructural* . Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- (s.f.).



| PARTS LIST | |
|------------|------------------------|
| ITEM | PART NUMBER |
| 1 | Soporte Trasero Base |
| 2 | Soporte Delantero Base |
| 3 | Base Principal |
| 4 | Pivote Trasero |
| 5 | Pivote Delantero |
| 6 | Soporte Pivote Frontal |

| | | | |
|---|--|---------------------------|--|
| TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009. | DIBUJADO POR Rodrigo Cabrera | FECHA 16/7/2019 |  UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt |
| | DISEÑADO POR Rodrigo Cabrera | FECHA 8/5/2019 | |
| | REVISADO POR | FECHA | |
| | APROBADO POR | FECHA | |
| TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± 0.5 .XX ± 0.50 .XXX ± ANGULAR ± 1 FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓ | NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Máquina Elíptica Versión 2 | | TÍTULO: Ensamble Base |
| MATERIAL BAMBÚ TRATAMIENTO DIESEL MASA: N/A | NÚMERO DE DIBUJO: 1 | | FORMATO B |
|  TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN | TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN. | | ESCALA: 0.12 UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 16 REV |



| PARTS LIST | | |
|-------------------------|------------------------|--------------|
| ITEM | PART NUMBER | |
| 1 | Soporte Trasero Base | |
| 2 | Soporte Delantero Base | |
| 3 | Base Principal | |
| 4 | Pivote Trasero | |
| 5 | Pivote Delantero | |
| 6 | Soporte Pivote Frontal | |
| TÍTULO: Ensamblaje Base | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 2 | | |
| FORMATO | ESCALA: 0.1 | UNIDADES: mm |
| B | PÁGINA 2 DE 16 | REV |

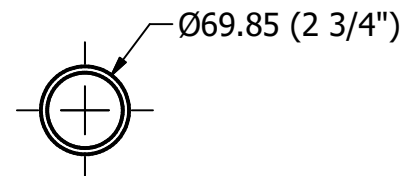
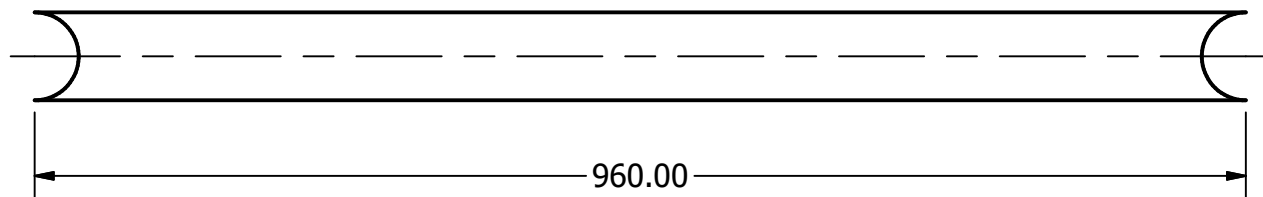
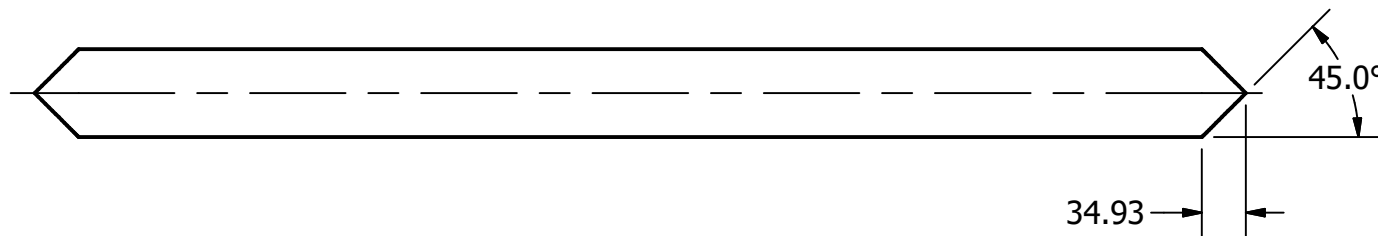
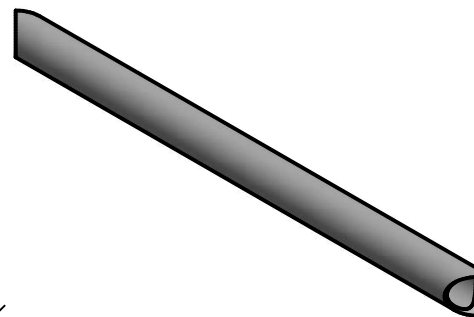
2



1

UTILIZAR GUADUA.

UNIÓN DE BOCA DE PEZCADO EN AMBOS LADOS.



B

B



A

A

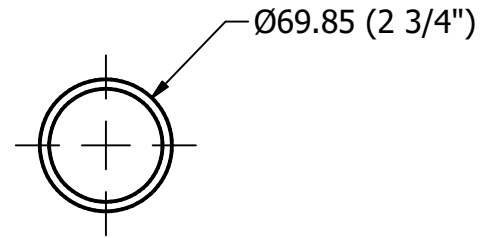
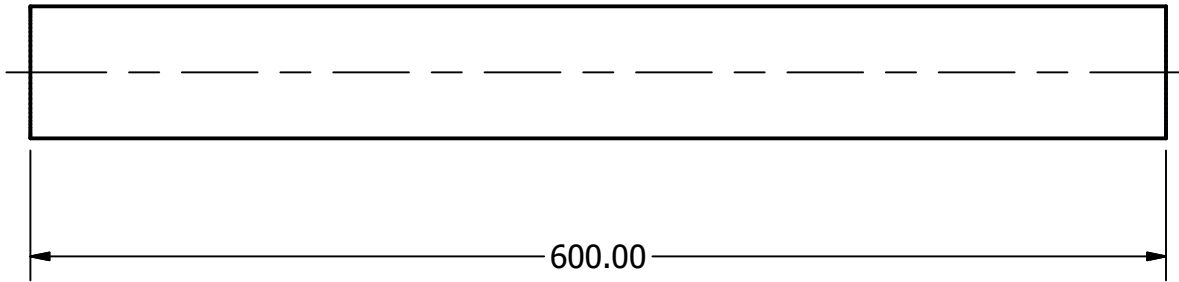
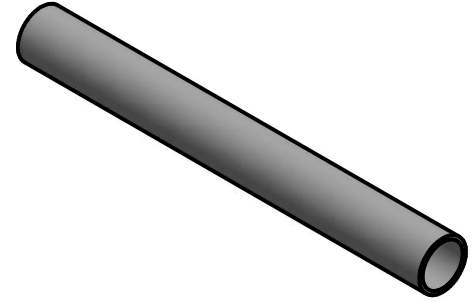
2



1

| | | |
|------------------------|----------------|--------------|
| TÍTULO: Base Principal | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 3 | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:6 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 3 DE 16 | REV |

UTILIZAR GUADUA.



TÍTULO: Soporte Delantero Base

NÚMERO DE DIBUJO: 4

FORMATO

ESCALA: 1:4

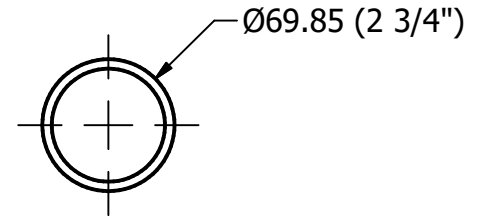
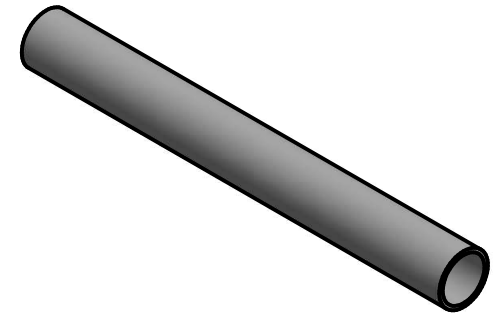
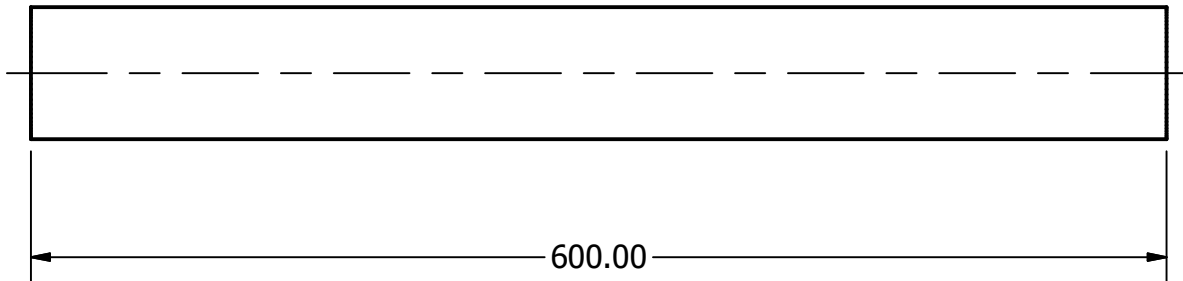
UNIDADES: mm

A

PÁGINA 4 DE 16

REV

UTILIZAR GUADUA.



TÍTULO: Soporte Trasero Base

NÚMERO DE DIBUJO: 5

FORMATO ESCALA: 1:4 UNIDADES: mm

A

PÁGINA 5 DE 16

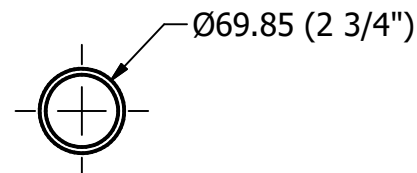
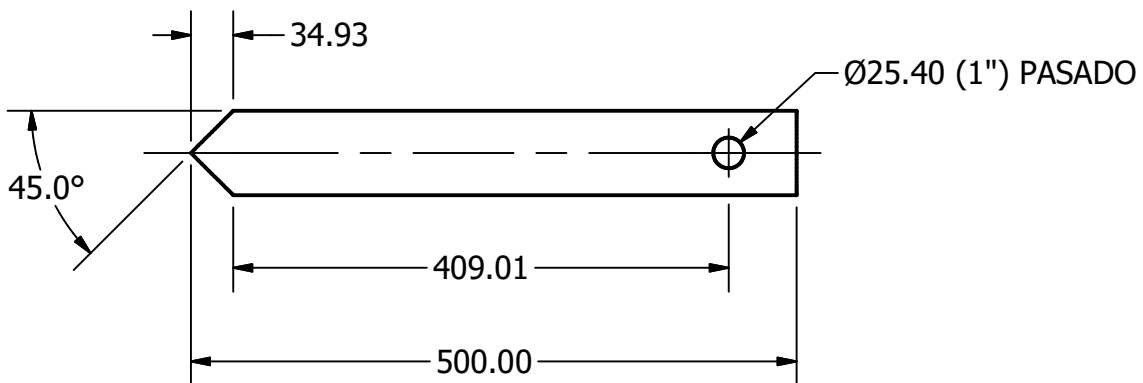
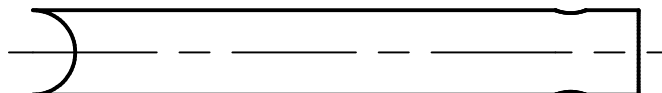
REV

2

1

UTILIZAR GUADUA.

UNIÓN DE BOCA DE PEZCADO.



A

A

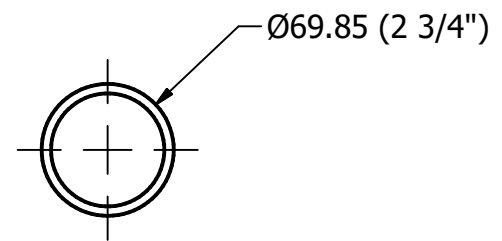
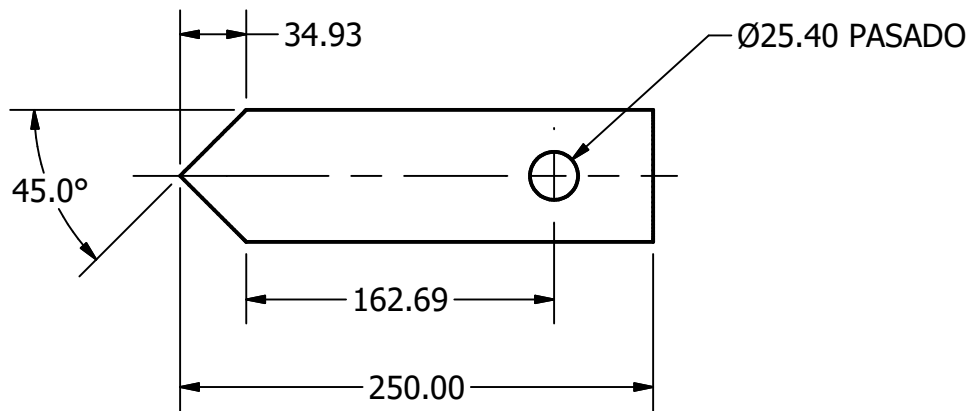
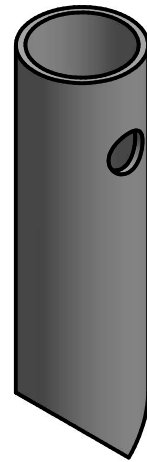
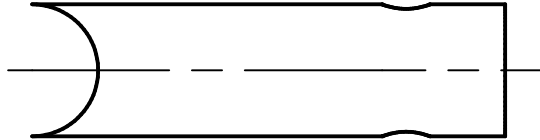
2

1

| | | |
|---------------------------------|----------------|--------------|
| TÍTULO: Pivote Delantero | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 6 | | |
| FORMATO | ESCALA: 0.16 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 6 DE 16 | REV |

UTILIZAR GUADUA.

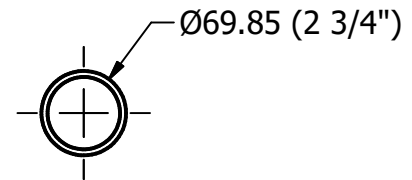
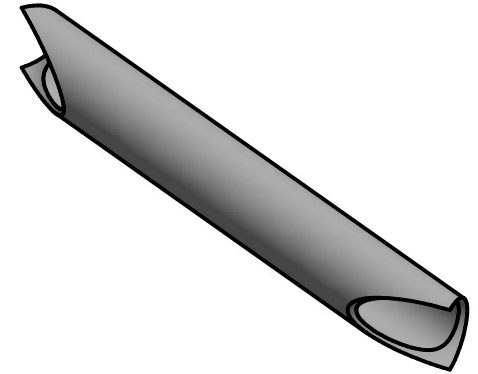
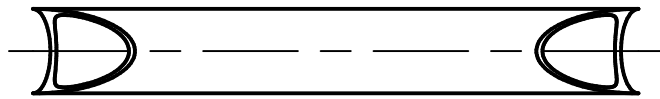
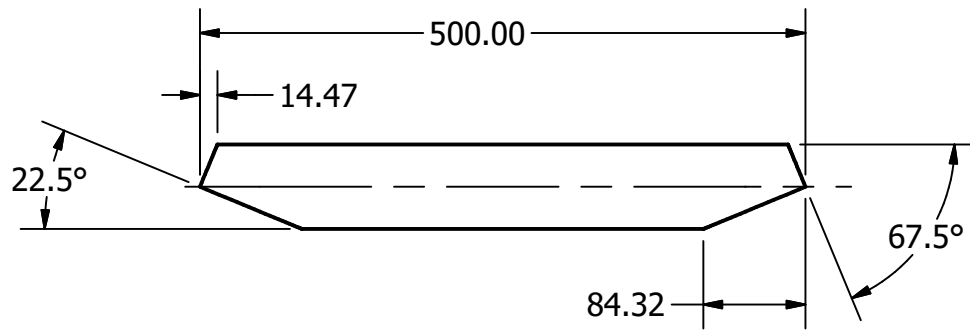
UNIÓN DE BOCA DE PEZCADO.



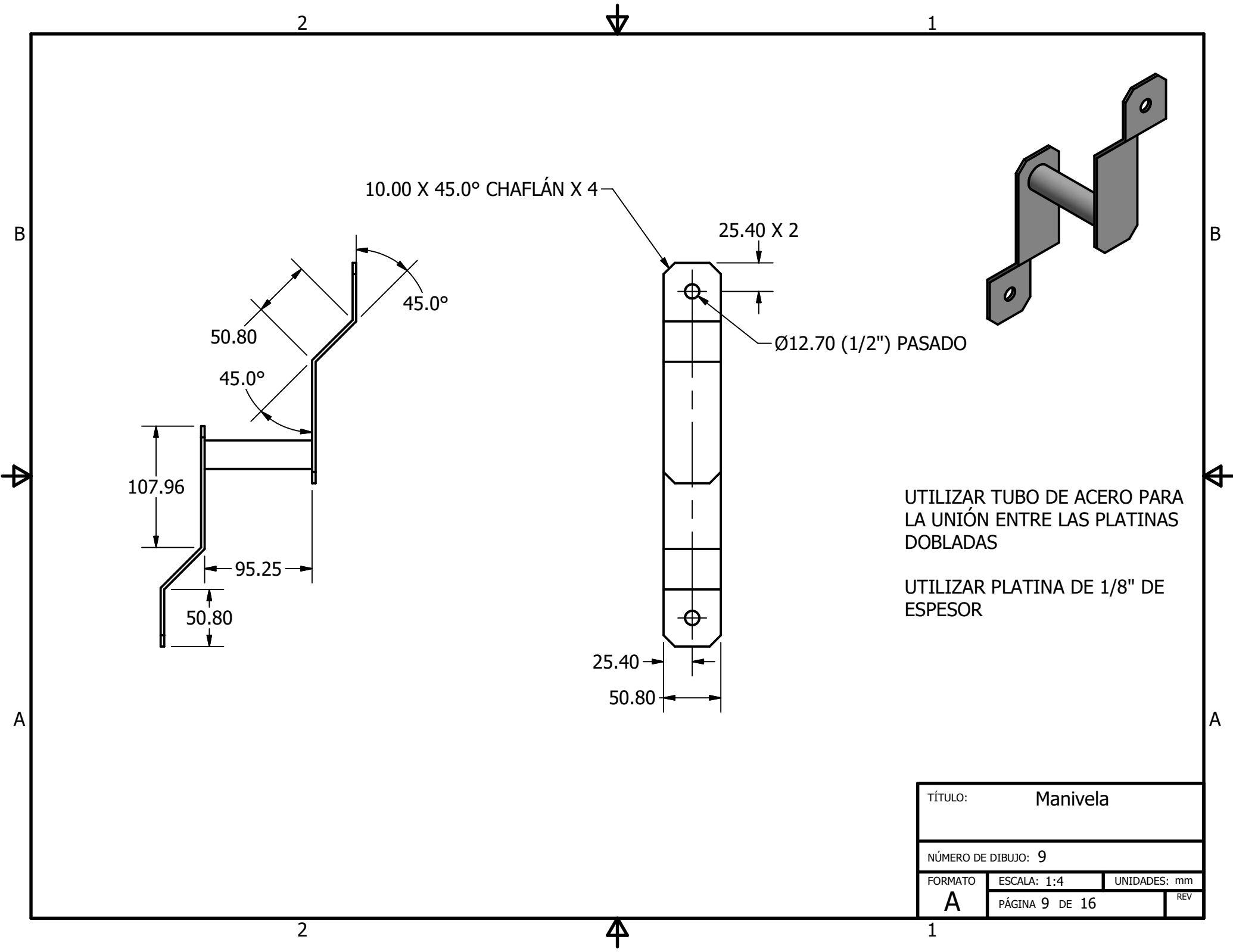
| | | |
|------------------------|----------------|--------------|
| TÍTULO: Pivote Trasero | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 7 | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:4 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 7 DE 16 | REV |

UTILIZAR GUADUA.

UNIÓN DE BOCA DE PEZCADO CON ÁNGULO DE
UNIÓN PARA 45 GRADOS EN ÁMBOS EXTREMOS.

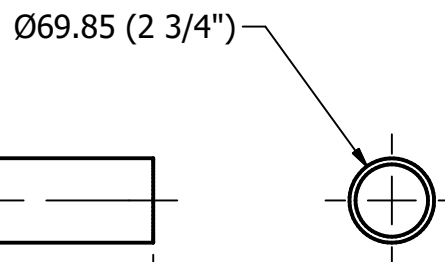
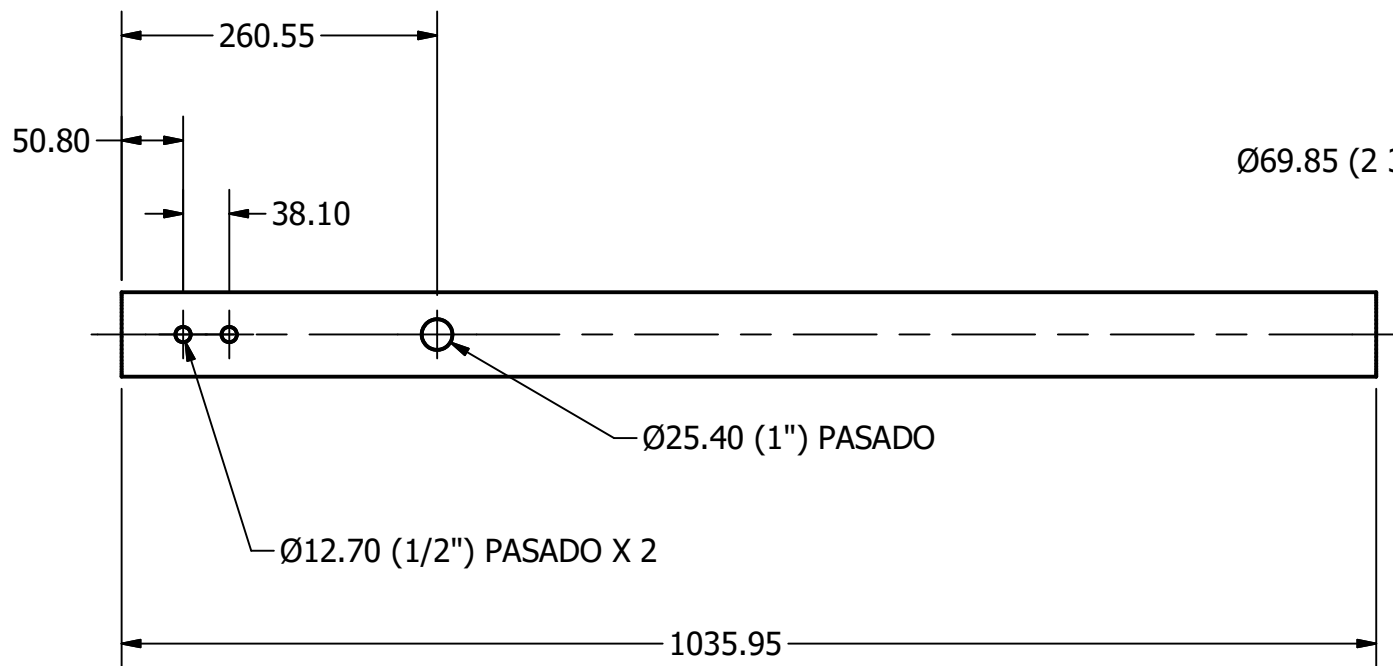
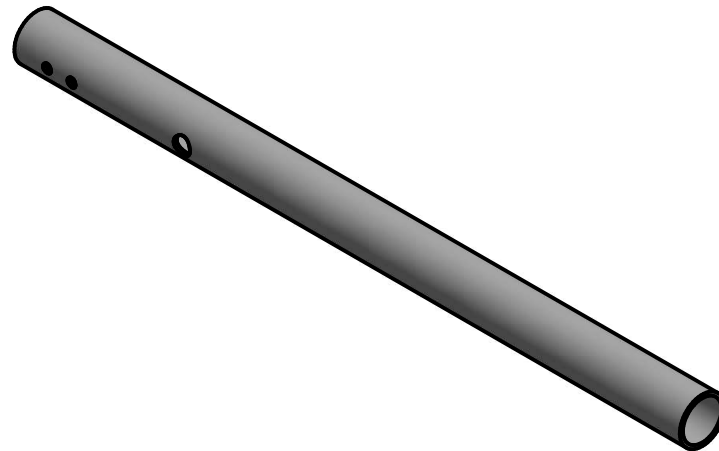


| | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|
| TÍTULO: Soporte Pivote Frontal | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 8 | | |
| FORMATO | ESCALA: 0,16 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 8 DE 16 | REV |



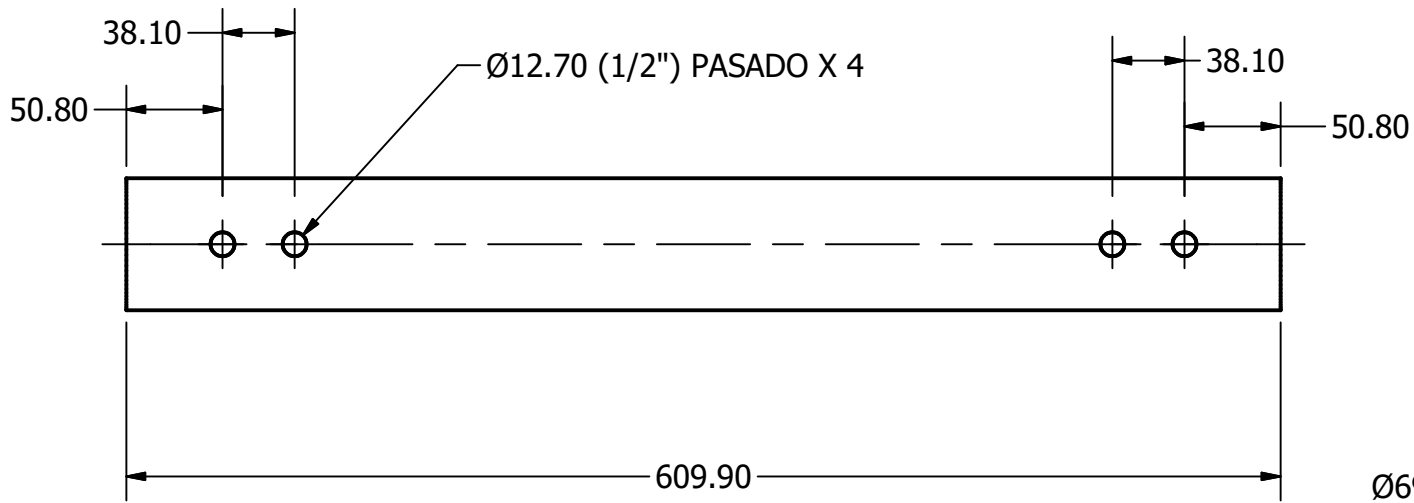
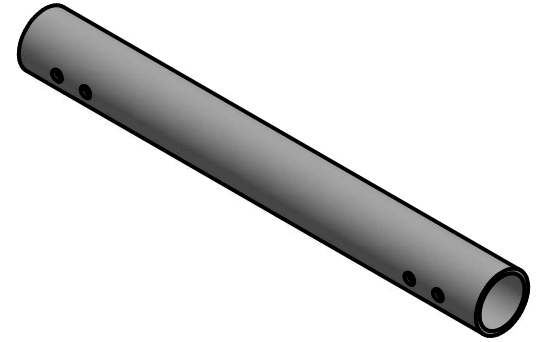
| | | |
|---------------------|----------------|--------------|
| TÍTULO: Manivela | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 9 | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:4 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 9 DE 16 | REV |

UTILIZAR VERTICILLATA



| | | | |
|----------------------|-----------------|--------------|-----|
| TÍTULO: | | Manija | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 10 | | | |
| FORMATO | ESCALA: 0.16 | UNIDADES: mm | REV |
| A | PÁGINA 10 DE 16 | | |

UTILIZAR VERTICILLATA

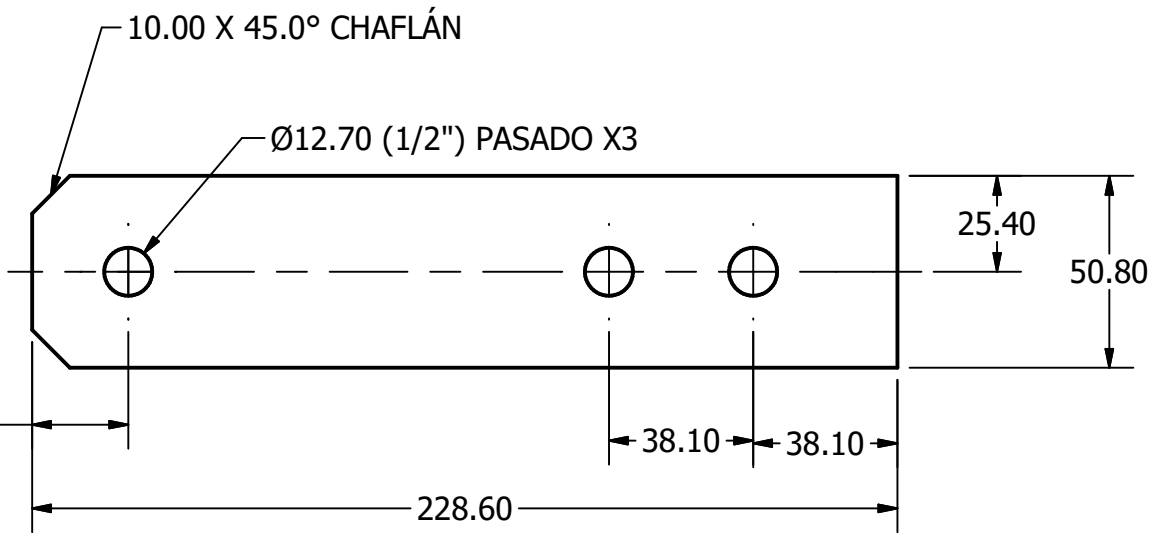
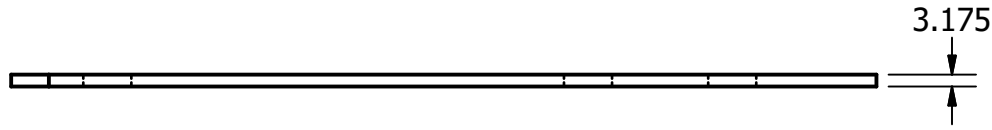


| | | | |
|----------------------|-----------------|--------------|--|
| TÍTULO: | | Largo | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 11 | | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:4 | UNIDADES: mm | |
| A | PÁGINA 11 DE 16 | REV | |

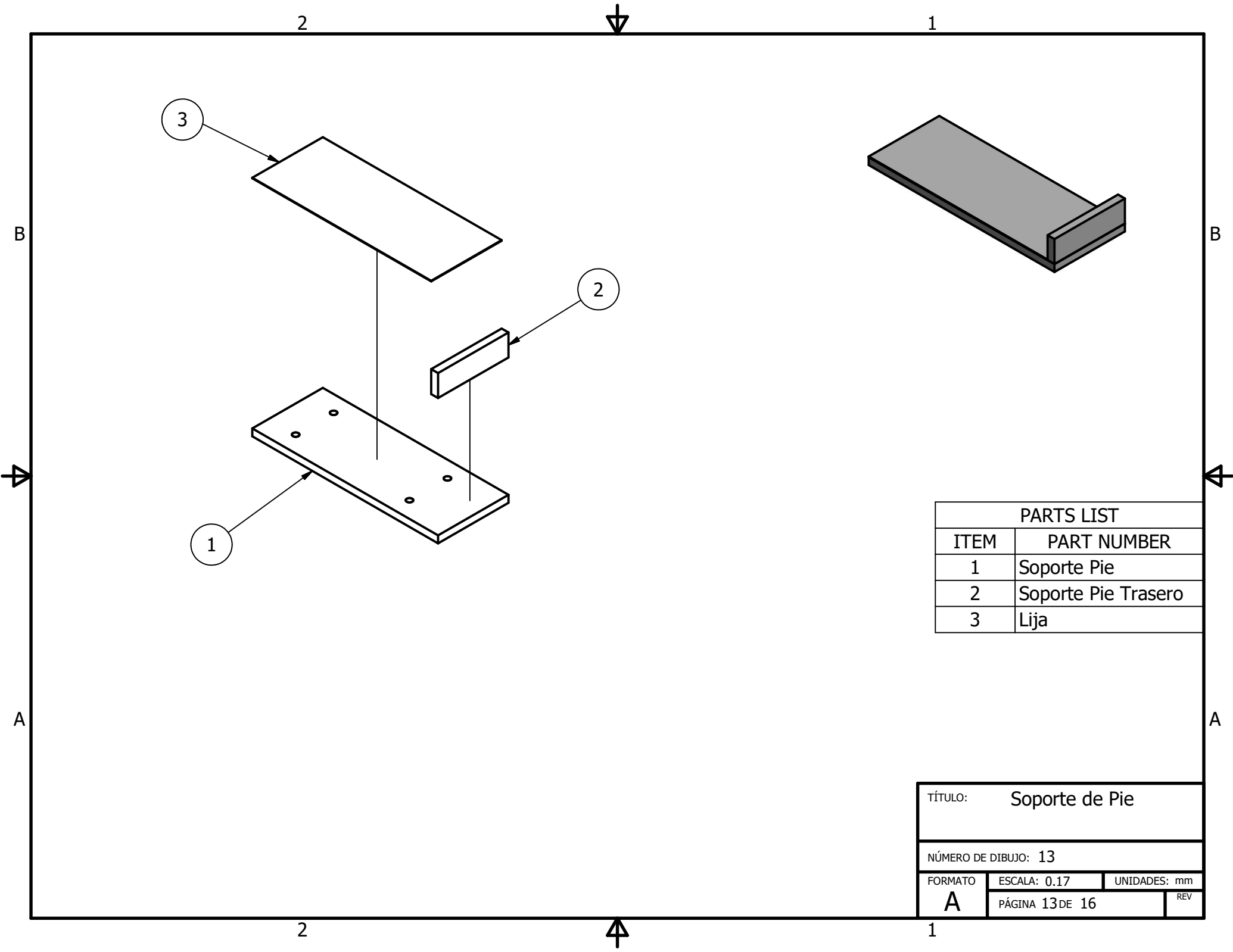
2

1

UTILIZAR PLATINA DE ACERO DE
1/8"



| | | | |
|----------------------|-----------------|--------------|--|
| TÍTULO: | | Platina | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 12 | | | |
| FORMATO | ESCALA: 1/2 | UNIDADES: mm | |
| A | PÁGINA 12 DE 16 | REV | |

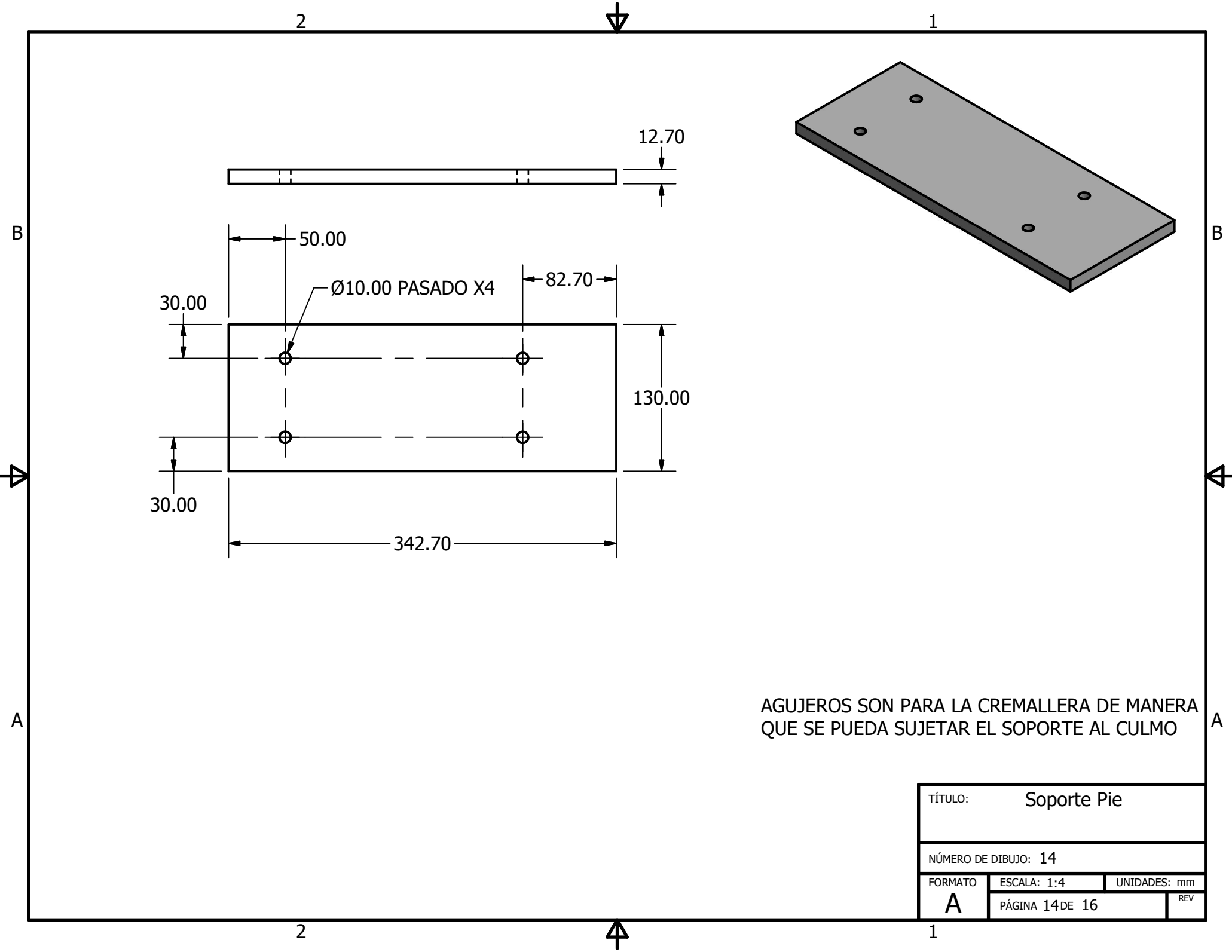


| PARTS LIST | |
|------------|---------------------|
| ITEM | PART NUMBER |
| 1 | Soporte Pie |
| 2 | Soporte Pie Trasero |
| 3 | Lija |

TÍTULO: Soporte de Pie

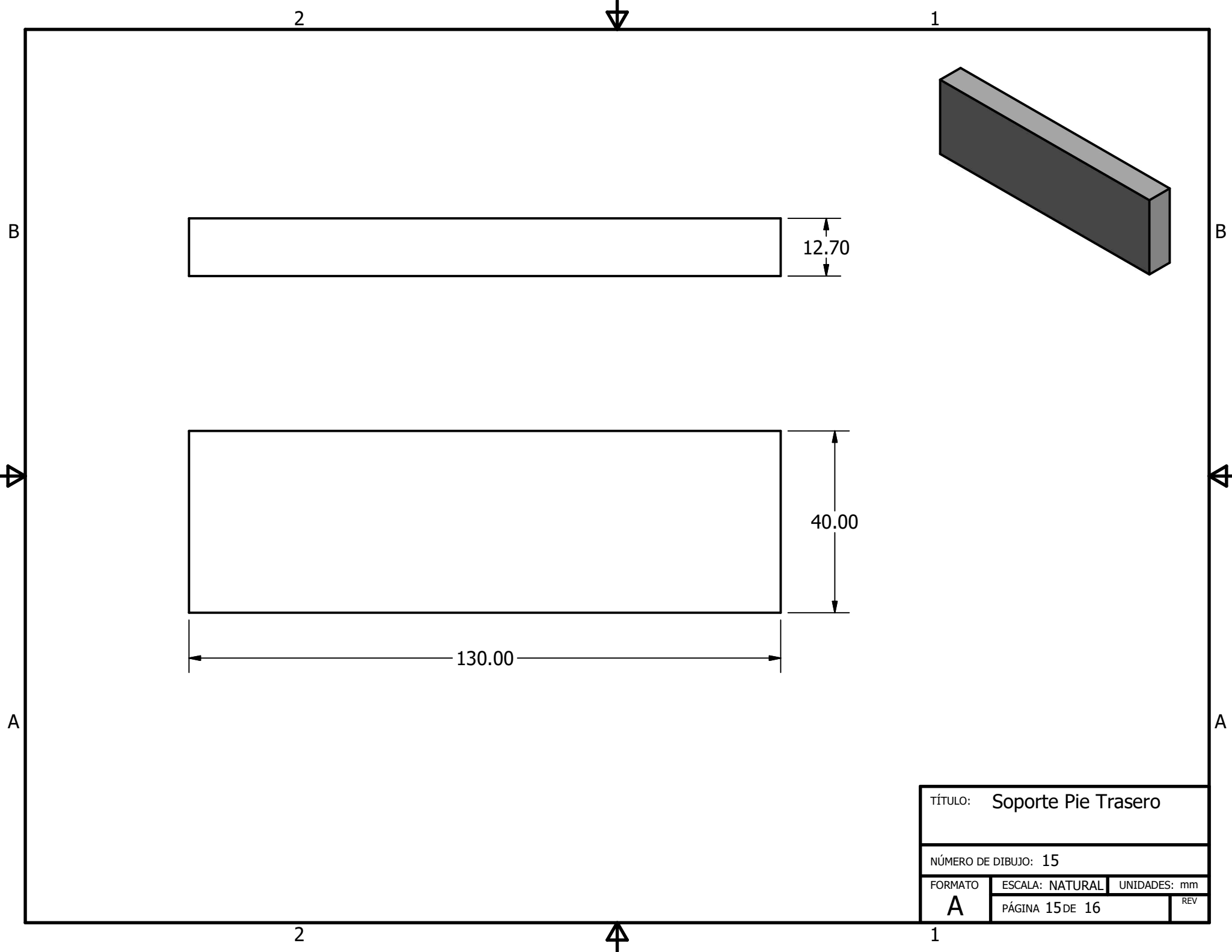
NÚMERO DE DIBUJO: 13

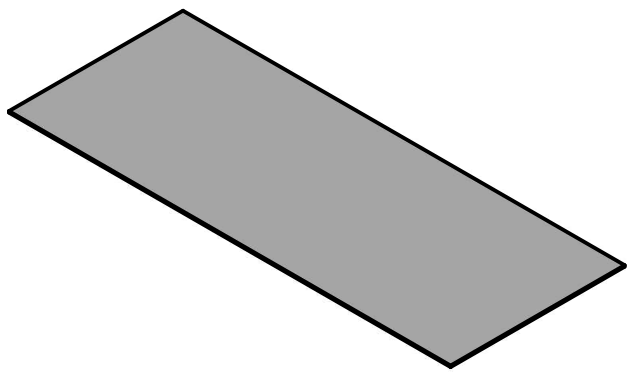
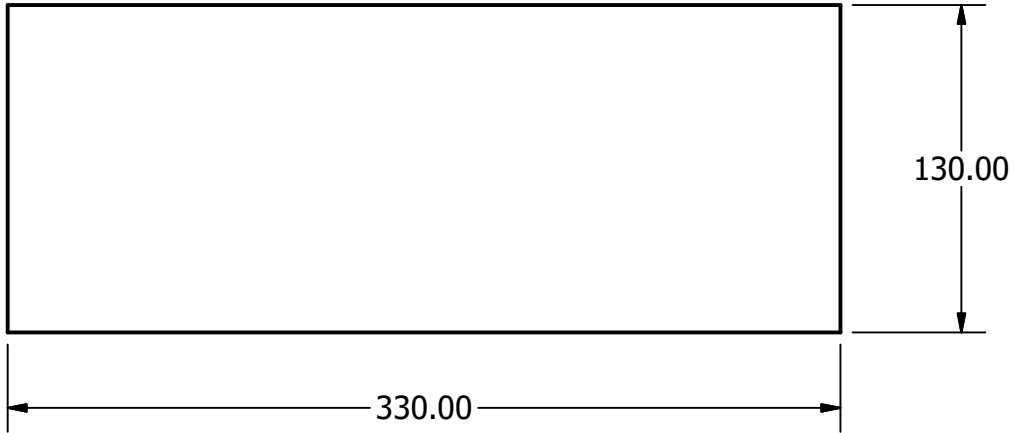
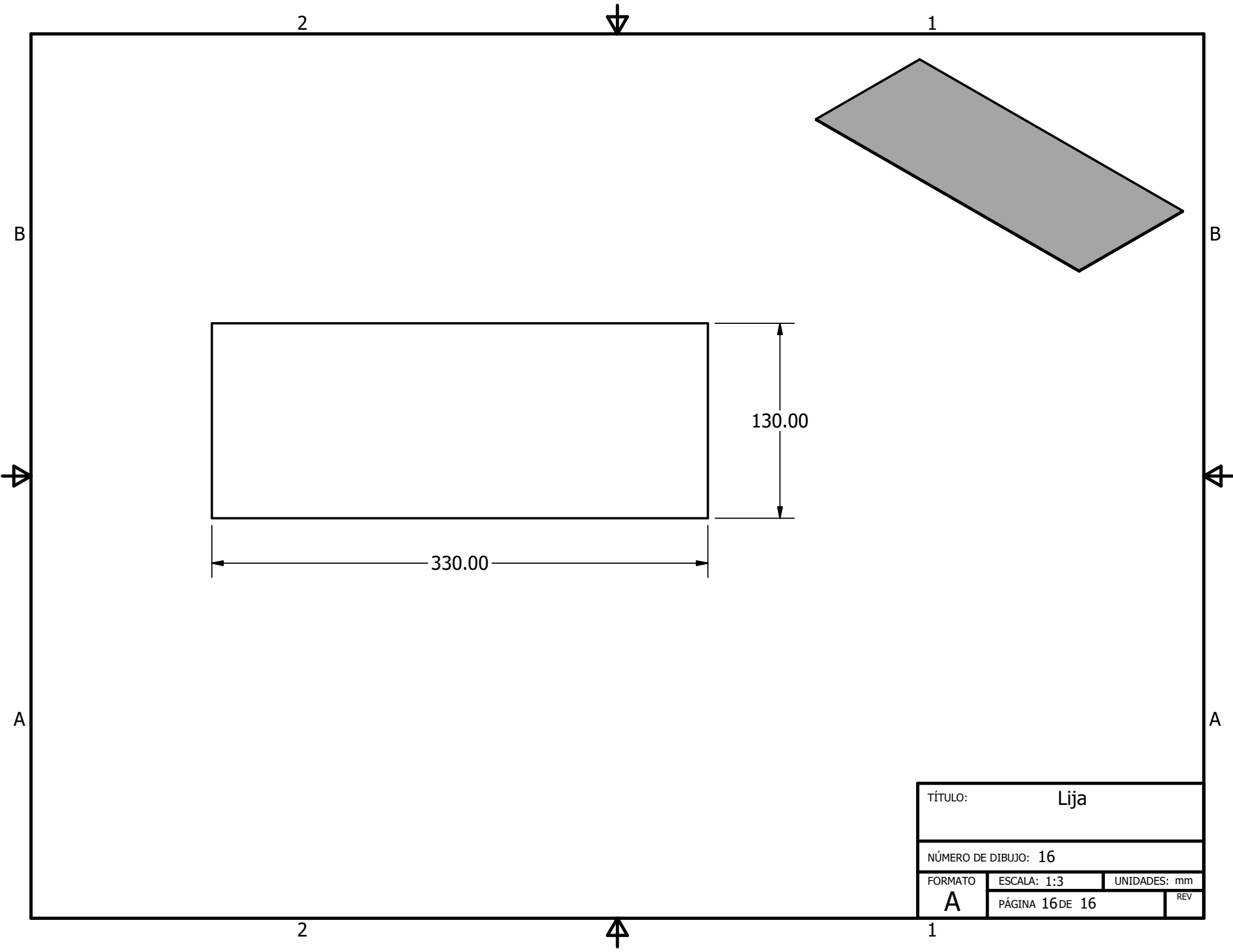
| | | |
|----------|-----------------|--------------|
| FORMATO | ESCALA: 0,17 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 13 DE 16 | REV |



AGUJEROS SON PARA LA CREMALLERA DE MANERA QUE SE PUEDA SUJETAR EL SOPORTE AL CULMO

| | | | |
|----------------------|-----------------|--------------|-----|
| TÍTULO: | | Soporte Pie | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 14 | | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:4 | UNIDADES: mm | REV |
| A | PÁGINA 14 DE 16 | | |





| | | |
|----------------------|-----------------|--------------|
| TÍTULO: Lija | | |
| NÚMERO DE DIBUJO: 16 | | |
| FORMATO | ESCALA: 1:3 | UNIDADES: mm |
| A | PÁGINA 16 DE 16 | REV |

