

Diseño e implementación de una máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina

Quinatoa Valladares Roland Steven y Sánchez Mejía Daniel Alejandro

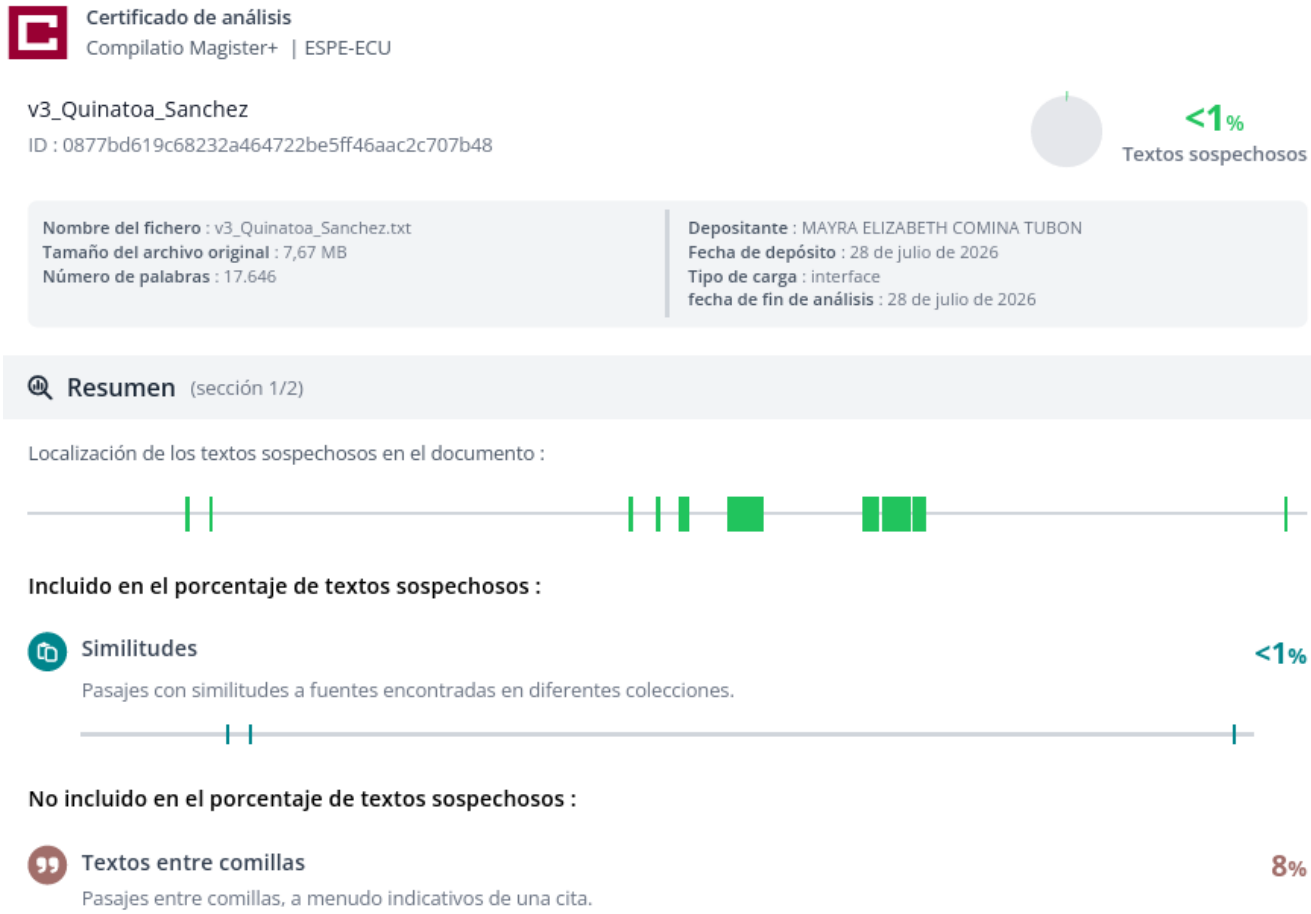
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Comina Tubón Mayra Elizabeth, PhD

28 de julio de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

v3_Quinatoa_Sanchez
ID : 0877bd619c68232a464722be5ff46aac2c707b48

<1%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : v3_Quinatoa_Sanchez.txt
Tamaño del archivo original : 7,67 MB
Número de palabras : 17.646

Depositante : MAYRA ELIZABETH COMINA TUBON
Fecha de depósito : 28 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 28 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :

Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 8%
Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MAYRA ELIZABETH COMINA TUBON

Ing. Comina Tubón Mayra Elizabeth, PhD

Directora

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Diseño e implementación de una máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina**" fue realizado por los señores **Quinatoa Valladares, Roland Steven y Sánchez Mejía, Daniel Alejandro,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MAYRA ELIZABETH
COMINA TUBON

Ing. Comina Tubón Mayra Elizabeth, PhD

Directora

C.C.: 1724994684

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Quinatoa Valladares, Roland Steven y Sánchez Mejía, Daniel Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 1724848500 y n° 1725302655, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular**: Diseño e implementación de una máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 28 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ROLAND STEVEN
QUINATOA VALLADARES

Quinatoa Valladares, Roland Steven

C.C.: 1724848500

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
DANIEL ALEJANDRO
SANCHEZ MEJIA

Sánchez Mejia, Daniel Alejandro

C.C.: 1725302655

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros **Quinatoa Valladares, Roland Steven y Sánchez Mejía, Daniel Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 1724848500 y n° 1725302655 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Título: Diseño e implementación de una máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 28 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ROLAND STEVEN
QUINATOA VALLADARES

Quinatoa Valladares, Roland Steven

C.C.: 1724848500

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
DANIEL ALEJANDRO
SANCHEZ MEJIA

Sánchez Mejia, Daniel Alejandro

C.C.: 1725302655

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación, con todo mi amor y gratitud, a mis padres, quienes han sido los pilares fundamentales de mi vida. Gracias por sus sacrificios, por sus enseñanzas y por haberme inculcado la disciplina necesaria para perseguir mis metas hasta verlas cumplidas. Su confianza incondicional en mi capacidad ha sido la luz que me guio en los momentos más complejos de esta carrera.

A mis hermanos, por ser mi refugio, mis confidentes y quienes, con su apoyo constante, hicieron que el camino fuera más ligero y lleno de momentos compartidos. Gracias por creer en mí tanto como yo creo en ustedes.

Finalmente, a mis amigos, compañeros de vida y de universidad. Gracias por acompañarme en cada etapa de este proceso, por las largas jornadas de estudio, los retos compartidos y por haber estado presentes en cada triunfo y dificultad. Este logro también les pertenece, pues nuestra amistad ha sido el motor que me permitió llegar hasta aquí con entusiasmo y determinación.

Quinatoa Valladares Roland Steven

Con el más profundo respeto, gratitud y cariño, dedico este trabajo de titulación a mis padres, pilares insustituibles en mi formación humana y profesional. Su esfuerzo desinteresado, sus sabios consejos y su amor incondicional han sido el cimiento sobre el cual he construido cada uno de mis proyectos. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia, por impulsarme a superar las adversidades y por confiar en mí en cada etapa de este camino. Este logro académico representa el fruto de sus sacrificios y es un testimonio del incalculable valor de sus enseñanzas.

.

Sánchez Mejía Daniel Alejandro

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), mi alma mater, por haberme brindado una formación académica de excelencia y los valores éticos que definirán mi desempeño como futuro Ingeniero en Mecatrónica.

A la Ing. Comina Tubón Mayra Elizabeth, mi tutora de tesis, por su dedicación, paciencia y orientación experta a lo largo de este proyecto. Gracias por sus valiosas observaciones y por exigir lo mejor de mí, lo cual fue determinante para alcanzar los objetivos propuestos en el diseño y fabricación de la enchapadora.

A la empresa Novocentro Cayambe, por la confianza depositada en mi trabajo y por permitirme integrar mis conocimientos técnicos en un entorno industrial real. Agradezco especialmente la apertura y colaboración de todo su equipo durante las etapas de desarrollo y pruebas de la maquinaria.

A mi familia, a mis padres y mis hermanos, quienes son la razón de mis esfuerzos y los motores de mis metas. Gracias por su amor incondicional, por entender mis ausencias durante las largas horas de investigación y por ser mi fuente inagotable de motivación. Este título es también el reflejo de su sacrificio y de todo el apoyo que me brindaron desde el primer día.

Quinatoa Valladares Roland Steven

Al concluir este trabajo de integración curricular, expreso mi sincera gratitud a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por haberme acogido en sus aulas y brindarme una formación técnica y humana rigurosa, la cual constituye el pilar de mi ejercicio profesional como Ingeniero en Mecatrónica.

Mi reconocimiento especial a la Dra. Mayra Elizabeth Comina Tubón, directora de este proyecto de titulación, por su valioso acompañamiento, criterio técnico y exigencia académica. Su guía permanente y sus observaciones fundamentadas fueron esenciales para orientar con éxito el desarrollo metodológico y la consolidación de la investigación.

A la empresa Novocentro Cayambe, por abrirme sus puertas y facilitar los recursos, espacios y facilidades operativas necesarios para realizar las pruebas de campo. Extiendo este agradecimiento al personal técnico de la planta por su disposición constante para colaborar durante la fase de validación y puesta a punto de la maquinaria.

Finalmente, a mi familia y en particular a mis padres, cuyo respaldo incondicional, valores inculcados y comprensión en los momentos de mayor dedicación académica hicieron posible la consecución de este objetivo. Su confianza fue la principal motivación para culminar esta etapa con solidez y determinación.

Sánchez Mejía Daniel Alejandro

Índice de contenidos

Dedicatoria 6

Agradecimiento 7

Resumen 16

Capítulo I 18

Introducción 18

Planteamiento del problema 18

Antecedentes 18

Planteamiento del problema 19

Justificación e importancia 20

Objetivos 21

- Objetivo general 21
- Objetivos específicos 21

Alance del proyecto 22

- Investigación y diseño 22
- Construcción de la enchapadora de cantos 22
- Pruebas y ajustes 23
- Documentación y presentación 23
- Limitaciones del proyecto 23

Capítulo II 26

Estado del arte 26

Evolución y ciencia de los paneles de ingeniería 26

Tecnología de superficies: laminación melamínica 27

Ingeniería de la adhesión y química de polímeros 28

Automatización y control en procesos de acabado 29
Sustentabilidad y ciclo de vida del producto 30
Capítulo III 34
Diseño e Implementación 34
Diseño conceptual 34
Sistema de encolado (Gluing) 37
QFD del sistema de encolado 37
Sistema de recorte (Trimming) 42
QFD del sistema de recorte 42
Sistema de corte de extremos (End Cutting) 47
QFD del sistema de corte de extremos 47
Diseño conceptual 52
Diseño mecánico 53
Parámetros de operación 53
Diseño del sistema Gluing 55
Subsistema encolado y caldera. 55
Subsistema de transmisión de potencia banda polea. 55
Subsistema de transmisión de potencia banda polea. 57
Subsistema de arrastre del rodillo de cinta de canto 57
Diseño del eje del rodillo motriz. 57
Reacciones producidas en el eje 59
Momento máximo para calcular el diámetro del eje 63
Análisis CAE de las fuerzas aplicadas en los ejes de los piñones conducidos 65
Selección de rodamientos 67
Diseño de subsistema prisionero para el tapacanto. 68
Diseño del sistema de corte del canto 72

Diseño rodillo de presión tapacanto tablero 76
Diseño de rodillo de presión pre y post trimming 78
Diseño del subsistema trimming 80
Diseño del resorte. 80
Diseño de estructura y mesa 85
Análisis CAE de la estructura de la máquina 90
Diseño del sistema electrónico 91
Dimensionamiento de protecciones 91
Dimensionamiento de conductores 94
Selección de contactores 95
Esquema eléctrico 96
Diseño del controlador PID temperatura 97
HMI 102
Implementación del prototipo 103
Implementación del sistema mecánico y estructural 103
Construcción de la estructura y mesa de soporte 103
Integración del Módulo de Encolado y Sistema de Arrastre 105
Estación de Corte de Extremos (End Cutting) 106
Estación de Recorte y Perfilado (Trimming) 106
Implementación del Sistema Eléctrico, Electrónico y de Control 107
Tablero de Control e Instrumentación Eléctrica 107
Integración del Sistema de Control y Automatización 108
Interfaz Hombre-Máquina (HMI) 109
Capitulo IV 110
Pruebas y resultados 110
Control de temperatura 110

Ensayo de laminado: exceso de canto en los extremos 112

Conclusiones 118

Recomendaciones 120

Referencias 122

Apéndices 125

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de trabajos revisados 31

Tabla 2. Necesidades del cliente e interpretación de diseño 37

Tabla 3. Selección del módulo del sistema de colado. 40

Tabla 4. Selección del submódulo de aplicación del adhesivo. 40

Tabla 5. Selección del submódulo de preparación del adhesivo. 41

Tabla 6. Selección del submódulo de control de temperatura. 41

Tabla 7. Selección del sistema motriz del sistema de colado. 42

Tabla 8. Sistema de presión del canto 43

Tabla 9. Selección del sistema de recorte. 45

Tabla 10. Selección del submódulo de la unidad de fresado inferior. 45

Tabla 11. Selección del submódulo del cabezal superior. 46

Tabla 12. Selección del submódulo de seguimiento de perfil. 46

Tabla 13. Selección del sistema de presión de recorte. 47

Tabla 14. Selección del sistema de guiado vertical. 47

Tabla 15. Selección de la unidad de fresado comercial. 47

Tabla 16. Selección de herramienta de corte. 48

Tabla 17. Selección del sistema de corte de extremos. 50

Tabla 18. Selección del accionamiento del sistema de corte de extremos. 50

Tabla 19. Selección del sistema de arrastre de cinta. 51

Tabla 20. Selección del sistema de detección del tablero. 51

Tabla 21. Resumen de módulos y submódulos para cada sistema. 52

Tabla 22. Parámetros de operación de la máquina enchapadora 55

Tabla 23. Anchos comerciales de tapacanto según espesor de panel 55

Tabla 24. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 56

Tabla 25. Parámetros del actuador neumático SDA 20x15 70

Tabla 26. Especificaciones del cilindro neumático seleccionado 74

Tabla 27. Especificaciones del resorte de seguimiento del cabezal superior 82

Tabla 28. Corrientes nominales de los componentes de la máquina enchapadora 94

Tabla 29. Diámetro de los conductores calculados 95

Tabla 30. Selección de contactores 96

Tabla 31. Parámetros del modelo FOPDT identificados para el calderín 98

Tabla 32. Parámetros del controlador PID — Método Cohen-Coon 102

Tabla 33. Errores calculados entre la respuesta PID simulada y respuesta real . 112

Tabla 34. Doe factorial para el laminado y excesos de canto 114

Índice de figuras

Figura 1. Sistema de encolado: componentes mecánicos, eléctricos y de control. 25

Figura 2. Sistema de corte: componentes mecánicos, eléctricos y de control. 25

Figura 3. Sistema de guiado: componentes mecánicos, eléctricos y de control 26

Figura 4. Diagrama de proceso. 26

Figura 5. Matriz QFD general del sistema de la máquina enchapadora. 36

Figura 6. Matriz QFD del sistema de encolado. 39

Figura 7. Matriz QFD del sistema de recorte. 44

Figura 8. Matriz QFD del sistema de corte de extremos. 49

Figura 9. Diseño conceptual para la máquina enchapadora de cantos. 54

Figura 10. Posición de los piñones y descomposición de la Fuerza sobre el eje de arrastre 59

Figura 11. Cargas en los puntos A y B del eje que alberga los piñones conducidos. 60

Figura 12. Diagrama de fuerzas sobre el eje de arrastre. 61

Figura 13. Cargas aplicadas en el eje (x-y). 61

Figura 14. Diagrama de corte y momento en el plano (x-y) 62

Figura 15. Cargas aplicadas en el eje (x-z) 63

Figura 16. Diagrama de corte y momento en el plano (x-z) 64

Figura 17. Resultado simulación, Tensión de Von Mises 66

Figura 18. Resultado simulación, Desplazamiento. 67

Figura 19. Eje de arrastre. 67

Figura 20. Rodillo de arrastre. 67

Figura 21. Ensamblaje rodillo de arrastre. 68

Figura 22. Basemotriz. 71

Figura 23. Acople vástago. 71

Figura 24. Cilindro guía. 71
Figura 25. Regulador de altura del canto. 72
Figura 26. Eje de guía. 72
Figura 27. Eje prisionero 72
Figura 28. Soporte actuador. 73
Figura 29. Ensamble entrada canto. 73
Figura 30. Cuchilla. 75
Figura 31. Guia soporte cuchilla. 75
Figura 32. Soporte guía. 76
Figura 33. Acople cuchilla actuador. 76
Figura 34. Soporte actuador SDA 50x20. 76
Figura 35. Pasador. 76
Figura 36. Ensamble end cutting. 76
Figura 37. Eje presión tapacanto tablero. 78
Figura 38. Soporte de ejes. 78
Figura 39. base ajuste presión tapacanto tablero. 78
Figura 40. Rodillo presión tapacanto tablero. 78
Figura 41. Rodillo superior presión tapacanto tablero. 79
Figura 42. Contratuerca rodillo superior superior presión tapacanto tablero. 79
Figura 43. Ensamble rodillo presión tapacanto tablero 79
Figura 44. Base rodillo presión. 80
Figura 45. eje rodillo presión. 80
Figura 46. rodillo presión 80
Figura 47. Ensamble rodillo presión. 81
Figura 48. Resorte. 84
Figura 49. Barra guía. 85

Figura 50. Soporte fresadora..... 85
Figura 51. Barra soporte del seguidor..... 85
Figura 52. Base trimming..... 85
Figura 53. Rodillos sistema trimming. 86
Figura 54. Ensamble sistema trimming..... 86
Figura 55. Estructura soporte. 90
Figura 56. Mesa soporte..... 90
Figura 57. Ensamble estructura. 91
Figura 58. Ensamble maquina enchapadora. 91
Figura 59. Resultado simulación, Tensión de Von Mises 91
Figura 60. Resultado simulación, Desplazamiento. 92
Figura 61. Respuesta al escalo del caldero y la recta tangente descrita. 99
Figura 62. Respuesta del controlador PID 103
Figura 63. HMI para a máquina enchapadora de cantos. 104
Figura 64.a) Vista general de la estructura soporte; b) Mesa de trabajo. 105
Figura 65. a) Módulo de encolado; b) Sistema de arrastre neumático. 107
Figura 66. Subsistema de corte de extremos con actuador neumático principal..... 107
Figura 67. Subsistema de recorte y perfilado. 108
Figura 68. Distribución de componentes industriales y cableado. 109
Figura 69. Controlador de temperatura 109
Figura 70. Interfaz gráfica de la venta web HMI operativa durante las pruebas del prototipo. 110
Figura 71. Respuesta controlador PID simulado e implementado. 112
Figura 72. Análisis de varianza del exceso de canto trasero 116
Figura 73. Diagrama de Pareto del exceso de canto trasero. 116
Figura 74. Análisis de varianza del exceso de canto delantero. 117

Figura 75. Diagrama de Pareto del exceso de canto delantero. 117

Figura 76. Análisis de varianza de la calidad de adherencia. 118

Figura 77. Diagrama de Pareto de la calidad de adherencia. 119

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar e implementar una máquina enchapadora de cantos semiautomática para paneles de melamina en Novocentro Cayambe, optimizando la calidad del acabado y los tiempos de producción. Mediante la metodología VDI 2206 y herramientas como QFD y simulación CAE, se integraron los subsistemas de encolado, recorte y corte de extremos en una estructura única. El equipo opera con cantos de 1,5 a 2,5 mm de espesor, una velocidad nominal de 5 m/min, presión de 6 bar y temperatura de adhesivo Hot-Melt entre 130 °C y 160 °C, gestionado mediante una interfaz HMI web en Logo Web Editor. El lazo térmico PID (REX-C100) alcanzó un error medio en régimen permanente de 0,31 °C para un tiempo de encendido de 20 s (Real 2), confirmando la convergencia del control. Asimismo, un diseño experimental factorial 2^3 con 24 corridas evaluó el efecto del espesor, la velocidad de avance y el material (PVC y ABS). El análisis de varianza (ANOVA) determinó que ningún factor influye significativamente en el exceso de canto trasero debido a la geometría fija del sistema; sin embargo, la velocidad de avance resultó ser el único factor determinante sobre el exceso delantero y la adherencia, al alterar el tiempo de respuesta neumático y la transferencia térmica. Se concluye que el prototipo responde a los requerimientos de precisión y estabilidad térmica, constituyendo una alternativa técnica y económicamente viable frente a equipos importados.

Palabras clave: Enchapadora de cantos, VDI 2206, Control PID, Adhesivo Hot-Melt, Diseño de Experimentos (DOE), Novocentro Cayambe

Abstract

This study designed and implemented a semi-automatic edgebanding machine for melamine panels at Novocentro Cayambe, optimizing surface finish quality and cycle times. Applying the VDI 2206 methodology along with engineering tools such as QFD and structural simulation, the gluing, trimming, and end-cutting subsystems were integrated into a single functional chassis. The equipment processes edgebands from 1,5 to 2.5mm in thickness at a nominal speed of 5m/min, 6 bar pneumatic pressure, and Hot-Melt adhesive temperatures between 130 °C and 160°C monitored via a web-based HMI interface in Logo Web Editor. The PID thermal control (REX-C100) achieved a steady-state mean error of 0.31°C for a 20s cycle time setting (Real 2) with a transient RMSE of 16.92°C, confirming closed-loop convergence. A 2^3 factorial experimental design with 24 runs evaluated the effects of thickness, feed speed, and material (PVC and ABS). Analysis of variance (ANOVA) determined that no factor significantly affects the rear edge excess due to the system's fixed mechanical geometry; however, feed speed proved to be the sole determinant for front edge excess and adhesion quality by altering response time and heat transfer. In conclusion, the prototype meets all precision and thermal stability requirements, representing a technically and economically viable alternative to imported machinery.

Keywords: Edgebander, VDI 2206, PID Control, Hot-Melt Adhesive, Design of Experiments (DOE), Novocentro Cayambe.

Capítulo I

Introducción

Planteamiento del problema

En el capítulo 1 se realizará una introducción detallada del proyecto enfocado en el desarrollo de maquinaria industrial, partiendo desde los antecedentes de la manufactura de tableros de madera hasta las limitaciones que tendrá el prototipo al finalizar el proyecto.

Antecedentes

La industria de la madera y el mueble ha cambiado mucho en las últimas décadas, reemplazando la madera maciza con tablas diseñadas como MDP (Medium Density Ppartyboard) y MDF (Medium Density Fiberboard). Estos materiales compuestos no sólo proporcionan una mejor estabilidad dimensional y sostenibilidad, sino que también permiten acabados estéticos de alta calidad mediante la aplicación de láminas de melamina (Franco, 2020. Sin embargo, esta evolución material ha creado desafíos técnicos específicos, especialmente en el tratamiento de los bordes del tablero, donde la estructura interna está expuesta a factores ambientales.

El proceso de relleno de bordes implica aplicar una cinta técnica normalmente hecha de PVC, ABS o melamina- a los bordes del tablero. Esto protege contra la humedad y los impactos mecánicos mientras mejora el aspecto del producto final (Arauco, 2015). Para las pequeñas y medianas empresas (PYME) en Ecuador, este proceso se ha hecho tradicionalmente a mano. Usar herramientas manuales y adhesivos de contacto en pequeños talleres toma demasiado tiempo y a menudo no cumple con los estándares de exportación o alta gama (Pasantez, 2022)

La automatización de este proceso mediante maquinaria especializada ha permitido integrar sistemas de encolado por calor, presión controlada y perfilado de precisión. El uso de adhesivos termofusibles o Hot Melt representa el estándar industrial actual, debido a su capacidad de solidificación inmediata y alta resistencia mecánica (Pizzi2016). No obstante, el acceso a esta tecnología suele estar limitado por los altos costos de importación de maquinaria

extranjera, lo que ha motivado el desarrollo de soluciones de ingeniería local que buscan democratizar la automatización en el sector mueblero nacional (Morocho2016).

Planteamiento del problema

El proceso de acabado de paneles de melamina en la compañía Novocentro Cayambe se enfrenta a problemas importantes que tienen un impacto negativo en su competitividad. En la actualidad, el sellado de los bordes perimetrales no tiene un método automatizado y estandarizado, lo que produce una dependencia excesiva de las habilidades manuales del operador. Esta fluctuación en el proceso de producción provoca imperfecciones en la adherencia y terminaciones superficiales irregulares que no son capaces de cumplir con las demandas del mercado actual.

La gestión del adhesivo es uno de los problemas técnicos que más frecuentemente se presentan. El pegamento puede experimentar cristalización o degradación térmica sin un sistema de control térmico preciso. Esto hace que la conexión entre el tapacanto y el sustrato de madera se debilite, lo que permite que la cinta se despegue en situaciones de humedad o uso diario (Adamik 2026). Asimismo, es habitual que la limpieza y el mantenimiento de los rodillos aplicadores en sistemas rudimentarios o manuales sean insuficientes. La acumulación de residuos quemados bloquea la dosificación uniforme, lo que provoca grumos que alteran el aspecto del mobiliario (RevistaMM, 2017).

A esto se le añade lo ineficiente que son los tiempos de entrega. Las fases de recorte y perfilado de las cintas excedentes se llevan a cabo como procesos manuales e independientes, lo que causa un embotellamiento en la línea productiva. Novocentro Cayambe no puede optimizar sus recursos humanos y materiales, lo que restringe su habilidad para reaccionar ante órdenes de gran volumen debido a la ausencia de una máquina que combine las funciones de encolado (gluing), corte de extremos (end cutting) y refinado (trimming).

Justificación e importancia

La ejecución de este proyecto es técnica y económicamente vital para la modernización operativa de Novocentro Cayambe. Desde el punto de vista técnico, la implementación de un sistema mecatrónico permitirá un control de lazo cerrado (PID) sobre la temperatura del calderín de pegamento, garantizando que el adhesivo trabaje siempre en su punto óptimo de viscosidad, eliminando así los problemas de falta de adherencia reportados en la bibliografía técnica (Morocho, 2016).

Desde una perspectiva económica y de eficiencia, la máquina reducirá drásticamente el desperdicio de insumos. Al automatizar el corte de precisión mediante actuadores neumáticos sincronizados, se elimina el exceso de cinta desperdiciada en cada tablero, lo que contribuye a una producción más sostenible y con una menor huella de carbono (Cambazoglu, 2025). Además, la capacidad de procesar diversos materiales como PVC, ABS y melamina en un solo equipo otorga a la empresa una versatilidad competitiva fundamental para diversificar su catálogo de productos (WEHO, 2024).

Por último, este proyecto tiene una justificación de autonomía en términos tecnológicos. La compra de equipos industriales importados implica una considerable inversión de capital y una dependencia del apoyo técnico extranjero (UrsaImport, 2025). Crear y diseñar una enchapadora local no solo disminuye los gastos de implementación, sino que además asegura que las habilidades técnicas y de mantenimiento se mantengan en la zona, lo cual potencia el progreso de la ingeniería mecatrónica aplicada a la industria del país.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar una máquina enchapadora de cantos semiautomática para paneles de melamina en la empresa Novocentro Cayambe, con el fin de optimizar la calidad del acabado y los tiempos de producción.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio del arte para el diseño y construcción de la máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina.
- Diseñar el sistema mecánico, electrónico y de control de la máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina.
- Diseñar una interfaz gráfica para el monitoreo y control de la máquina
- Implementar los sistemas diseñados para el funcionamiento de la máquina enchapadora de cantos.
- Validar el funcionamiento de la máquina mediante pruebas de desempeño en condiciones reales de operación.

Alance del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es diseñar e implementar una máquina enchapadora de cantos semiautomática que permita optimizar el proceso de enchapado de paneles de melamina en la empresa Novocentro Cayambe. La máquina estará compuesta por módulos funcionales como el sistema de encolado (gluing), recorte (trimming) y corte final (end cutting), los cuales operarán de manera coordinada mediante un tablero de control centralizado. El sistema incluirá elementos mecánicos, sensores y controladores para regular parámetros críticos como la temperatura de adhesión y la sincronización del corte, garantizando así precisión, eficiencia y seguridad operativa. El proyecto se llevará a cabo en varias etapas:

Investigación y diseño

- Estudiar el funcionamiento de los sistemas que integran una máquina enchapadora industrial.
- Analizar técnicas y métodos aplicados en los procesos de encolado, recorte y corte final.
- Revisar recomendaciones de diseño y construcción específicas para los sistemas de encolado, recorte y corte final.
- Desarrollar el diseño conceptual de la máquina semiautomática de enchapado de cantos, basándose en los hallazgos previos.

Construcción de la enchapadora de cantos

- Seleccionar y adquirir los componentes necesarios para la construcción de los sistemas de gluing, trimming y end cutting.
- Ensamblar los elementos funcionales de cada uno de los sistemas diseñados.
- Instalar y cablear los componentes electrónicos y eléctricos requeridos para el funcionamiento de la máquina.
- Configurar el sistema de control semiautomático mediante un tablero centralizado con interruptores, indicadores y sistema de paro de emergencia.

Pruebas y ajustes

- Realizar pruebas iniciales de funcionamiento para verificar la operación de los sistemas de gluing, trimming y end cutting.
- Evaluar el desempeño de la máquina en condiciones reales de trabajo con paneles de melamina.
- Identificar posibles fallos o deficiencias operativas en los sistemas mecánicos, eléctricos o de control.

- Efectuar ajustes necesarios en los parámetros, alineación o configuración de componentes para optimizar la precisión y eficiencia del proceso de enchapado.

Documentación y presentación

- Realizar pruebas iniciales de funcionamiento para verificar la operación de los sistemas de gluing, trimming y end cutting.
- Evaluar el desempeño de la máquina en condiciones reales de trabajo con paneles de melamina.
- Identificar posibles fallos o deficiencias operativas en los sistemas mecánicos, eléctricos o de control.

Limitaciones del proyecto

- El proyecto se enfoca únicamente en el diseño, implementación y validación de un prototipo funcional de máquina enchapadora de cantos semiautomática; no contempla la producción en serie ni la comercialización del equipo.
- El sistema de control estará compuesto por módulos independientes, incluyendo un controlador digital para el sistema de temperatura, el cual integrará internamente un algoritmo PID que permitirá mantener los niveles térmicos requeridos durante el proceso de encolado.
- El diseño está orientado al procesamiento de paneles de melamina dentro de los parámetros operativos definidos por la empresa Novocentro Cayambe; no se garantiza su funcionamiento con otros materiales o dimensiones fuera de ese rango.
- Las pruebas de validación se realizarán en condiciones reales de operación, pero limitadas al entorno y recursos disponibles en la empresa colaboradora.

En el desarrollo del presente proyecto se abordaron tres áreas fundamentales: los sistemas mecánico, eléctrico y de control, procurando una integración coherente y eficiente entre ellos.

A continuación, se presentan representaciones gráficas que detallan cada sistema y sus componentes correspondientes como se muestra en la Figura 1 referente al sistema de encolado, en la Figura 2 referente al sistema de corte, en la Figura 3 referente al sistema de guiado.

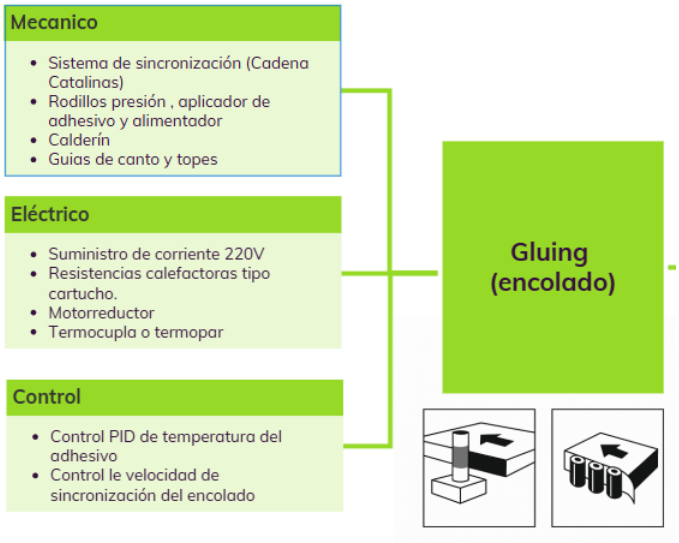


Figura 1. Sistema de encolado: componentes mecánicos, eléctricos y de control.

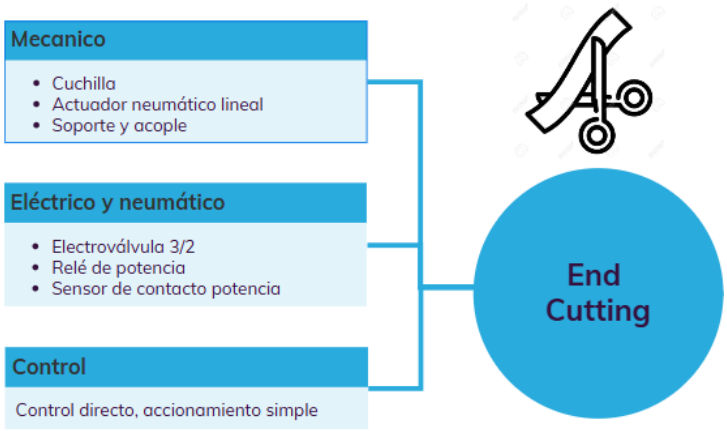


Figura 2. Sistema de corte: componentes mecánicos, eléctricos y de control.

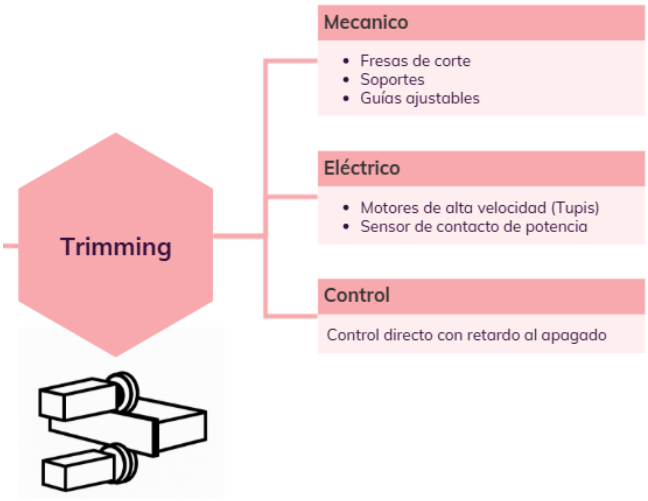


Figura 3. Sistema de guiado: componentes mecánicos, eléctricos y de control

En Figura 4 se muestra el sistema de proceso de la máquina enchapadora de cantos para paneles de melamina.

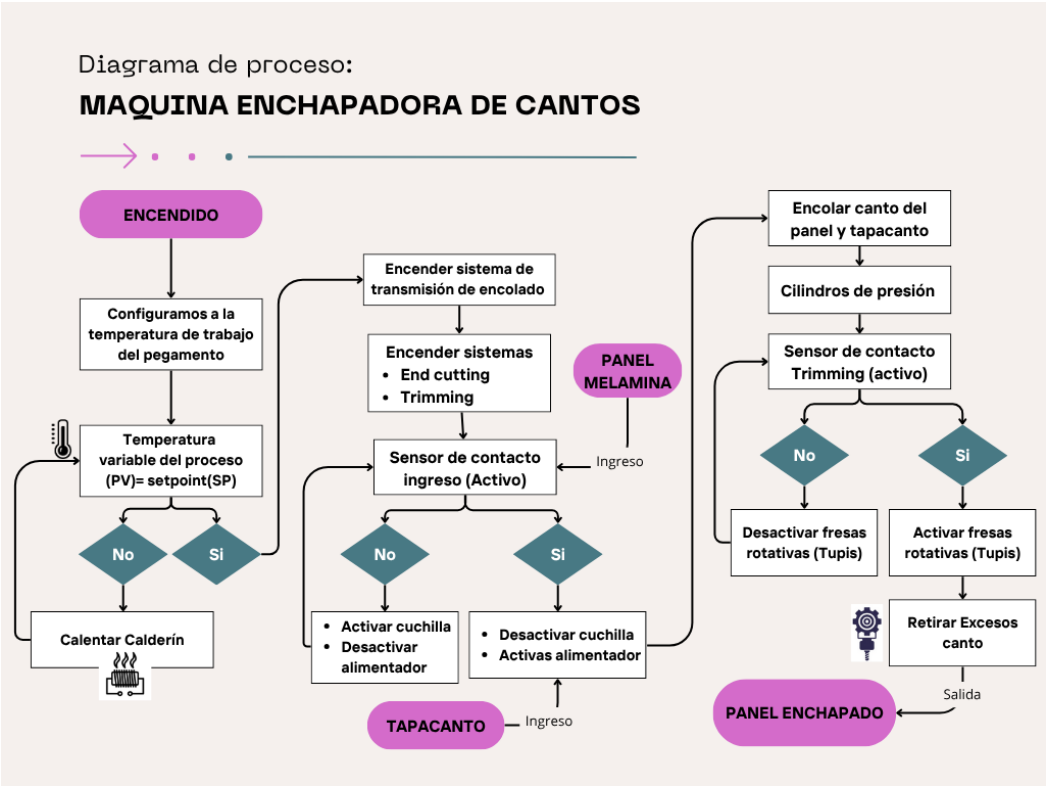


Figura 4. Diagrama de proceso.

Capítulo II

Estado del arte

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte que fundamenta el procesamiento de paneles de madera y la tecnología de enchapado. El análisis se desplaza desde la ciencia fundamental de la madera hasta las innovaciones de vanguardia en mecatrónica y sostenibilidad, estableciendo el marco comparativo necesario para el diseño de la máquina enchapadora en Novocentro Cayambe.

Evolución y ciencia de los paneles de ingeniería

El avance de materiales compuestos ha cambiado la industria del mueble, posibilitando una transición de la madera sólida a productos con características predecibles y un uso más eficiente de los bosques. De acuerdo con los principios de la ciencia de la madera, la estabilidad de un tablero está determinada por cómo interactúan sus fibras y cuán homogénea es su estructura interna (Kollmann, 1984, Rydholm1993). En este marco, los tableros de fibras (MDF) y de partículas (MDP) se han establecido como los sustratos predominantes por su habilidad para resistir procesos complejos de mecanizado y su relación costo-eficiencia (FPL2010, Youngquist, 1999).

La microestructura de estos paneles define el comportamiento de los esfuerzos cortantes durante el proceso de canteado. Mientras que el MDF presenta una densidad uniforme que facilita un corte limpio, el MDP posee un núcleo más poroso que exige una mayor viscosidad en el adhesivo para evitar una absorción excesiva que debilite la unión (Comparison, 2025, Rocplex). Esta variabilidad estructural requiere que las máquinas enchapadoras posean sistemas de presión ajustables, capaces de compensar las irregularidades nanométricas de la superficie del canto (ITC, 2017, COST, 2008).

Asimismo, la resistencia a la flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) son parámetros gobernados por la calidad de las resinas aglutinantes utilizadas en la fabricación

del tablero. La normativa técnica sugiere que el contenido de humedad del panel debe mantenerse entre un 6% y 10% para garantizar que el choque térmico al aplicar el adhesivo Hot Melt no genere delaminación o tensiones internas residuales (COST, 2008). El conocimiento de estas propiedades mecánicas permite dimensionar correctamente los motores de las estaciones de perfilado, asegurando que la herramienta de corte no sufra desgaste prematuro por la densidad del material (FPL, 2010)

Tecnología de superficies: laminación melamínica

La laminación de melamina constituye la interfaz esencial entre el mobiliario y su medio ambiente. Este procedimiento consiste en la impregnación de papeles decorativos con resinas de melamina-formaldehído, que crean una superficie muy dura, bajo condiciones controladas de presión y temperatura (Lamination, 2025, Nemli,2009). Este revestimiento es relevante no solo por su aspecto estético; se ha comprobado que funciona como una barrera técnica efectiva que disminuye de manera considerable el índice de emisión de formaldehído desde el núcleo del panel hacia fuera.

La geometría de las partículas del sustrato y el tiempo de prensado están directamente relacionados con la durabilidad de la superficie melamínica. Los estudios indican que una distribución no uniforme de las partículas subyacentes tiene la capacidad de generar microfisuras en la capa de resina, lo que pone en riesgo su resistencia al rayado (Adamik, 2026, Blanchet,2005). Por esta razón, la incorporación de capas de papel melamínico con gramática elevada no solamente potencia el acabado visual, sino que fortalece la estabilidad dimensional del panel ante cambios en las condiciones ambientales higroscópicas (Bardak2011, Franco, 2024).

Además, el desempeño de estas superficies en condiciones de uso severo está normado por estándares de resistencia a la abrasión. Los paneles utilizados en áreas de alto tráfico deben cumplir con ciclos específicos de desgaste, lo cual se logra optimizando la relación resina-papel durante la impregnación (SonaeArauco, 2020, Globaldis). En el diseño de

la enchapadora, esta dureza superficial obliga a implementar sistemas de limpieza y pulido que eliminen residuos de adhesivo sin rayar el recubrimiento protector, manteniendo la integridad del diseño original del tablero (Sparkes 2005, Fraunhofer 2020).

Ingeniería de la adhesión y química de polímeros

El enchapado de cantos constituye un desafío mecatrónico centrado en la ingeniería de adhesión. La efectividad de la unión entre la cinta técnica y el borde del panel depende de fenómenos de anclaje mecánico y fuerzas moleculares en la interfase (Hunt 1974, Rowell 2013). Los adhesivos termofusibles (Hot Melt) son los componentes más utilizados, requiriendo un control térmico preciso para evitar la degradación del polímero durante su aplicación en el calderín (Pizzi 2016).

La reología del adhesivo en su punto de fusión determina la profundidad de penetración en los poros de la madera. Si la temperatura es demasiado baja, se produce un "pegado en frío" que resulta en el desprendimiento del canto ante esfuerzos mínimos; por el contrario, un exceso de calor oxida el adhesivo, perdiendo sus propiedades elásticas (RevistaMM 2017). En este sentido, la modificación térmica de los sustratos ha surgido como una técnica para mejorar la energía superficial, facilitando un anclaje más robusto incluso en paneles con alta resistencia a la humedad de clase P3 (Hil l2006, BioresourcesP3).

Es fundamental considerar también el tiempo de apertura del adhesivo, que es el intervalo en el que este permanece activo antes de solidificarse. Este factor es crítico para sincronizar la velocidad de avance de la cadena de transporte con el rodillo aplicador (Pizzi 2016). Un mal ajuste en esta sincronización produce líneas de cola visibles o falta de adherencia en los extremos del panel, problemas que deben ser mitigados mediante el diseño de un sistema de control de temperatura en lazo cerrado dentro de la máquina semiautomática (Rowell 2013, BioresourcesP3).

Automatización y control en procesos de acabado

La automatización de las etapas de canteado ha evolucionado desde herramientas manuales básicas hacia sistemas integrados que realizan el encolado, corte y perfilado en una sola operación (Pasantez 2022, Arauco 2015). El diseño de maquinaria nacional ha demostrado que es posible alcanzar niveles de precisión industrial mediante el uso de actuadores neumáticos y control electrónico sincronizado que garantice la repetibilidad del proceso (UPS 2016, Morocho 2016). Estas máquinas deben gestionar de forma eficiente el excedente de canto melamínico sin comprometer la integridad de la cara del tablero (UrsaImport, WEHO Machinery).

La implementación de sistemas de fresado de alta velocidad para el perfilado del canto requiere un análisis de las vibraciones mecánicas. Cualquier desbalance en el cabezal motorizado puede inducir ondas en el acabado final, lo que en la industria se conoce como "efecto de vibración" (UPS 2016). Por lo tanto, el uso de guías lineales de precisión y estructuras rígidas es obligatorio para soportar las fuerzas de corte generadas a más de 12,000 RPM, garantizando que el chaflán o radio del canto sea perfectamente uniforme en toda la longitud del panel (Arauco 2015, Morocho 2016).

En el nivel de vanguardia, el control de calidad se ha visto potenciado por la integración de sistemas de inspección avanzados. El uso de sensores que operan fuera del espectro visible permite detectar micro-defectos de adhesión o irregularidades cromáticas en tiempo real, asegurando que la producción cumpla con los estándares de manufactura 4.0 (Aguilera 2018, PMC 2018).

Estas innovaciones reducen drásticamente el desperdicio de material y aumentan la confiabilidad de los procesos en plantas de mediano tamaño que buscan escalar su capacidad operativa sin sacrificar la calidad artesanal (Fraunhofer 2021, PMC 2018).

Sustentabilidad y ciclo de vida del producto

La industria actual requiere un compromiso con la sostenibilidad del medioambiente. El estudio del ciclo de vida en la fabricación de paneles melamínicos muestra que el rendimiento energético durante el proceso de acabado tiene un impacto directo en la huella de carbono del mueble (Cambazoglu 2025). El uso de maquinaria automatizada ayuda a disminuir los desechos de adhesivos y mejora el uso de materiales plásticos como el PVC y el ABS, lo que reduce al mínimo la huella medioambiental por cada pieza producida.

El cumplimiento de las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) se ha convertido en una ventaja competitiva esencial, certificando que los paneles utilizados son parte de una cadena productiva responsable y baja en emisiones (EPD Particleboard 2025, EPD MDF 2025, Environdec 2025). Así, la máquina enchapadora proyectada para Novocentro Cayambe no solo representa una mejora en la productividad y ergonomía, sino una herramienta estratégica para alinear la producción local con los estándares internacionales de eco-eficiencia y durabilidad prolongada del mobiliario (Lamination 2025, Rocplex).

En la siguiente Tabla *1* se encuentra el resumen de las referencias de los trabajos revisados para la elaboración del estado del arte.

Tabla 1.

Resumen de trabajos revisados

N°	Autores	Año	Título del trabajo	Principales hallazgos utilizados
1	Aguilera & Sappa	2018	Melamine Faced Panels Defect Classification	Uso de visión artificial para control de calidad en paneles.
2	Adamik, Ł.	2026	Evaluation of Melamine Coating Integrity	Impacto de las impurezas en el tablero sobre el recubrimiento.
3	Bardak, S.	2011	Effect of decor paper and adhesive type	Influencia de la gramática del papel en la resistencia mecánica.
4	Cambazoğlu et al.	2025	Carbon footprint evaluation	Análisis de emisiones de CO_2 en la producción de melamina.
5	Nemli & Polat	2009	Effect of press parameters	Relación entre presión/calor y resistencia superficial.
6	Medved & Forštnarič	2018	Formaldehyde barrier efficiency	El enchapado como bloqueador de gases tóxicos.
7	Blanchet et al.	2005	Bark particleboard and melamine overlay	Influencia de la geometría de partículas en el acabado.
8	Franco, M. P.	2024	Physical-mechanical properties of MDP	Mejora del MDP mediante el recubrimiento melamínico.
9	Sparkes, T.	2005	Choosing decorative surface coating materials	Criterios de selección de recubrimientos para interiores.
10	COST EU	2008	Wood-Based Panels Technical Report	Datos técnicos sobre la fabricación de tableros melamínicos.
11	Bioresources	2025	Lab testing for P3 moisture resistant boards	Desempeño de tableros resistentes a la humedad en canteado.

N°	Autores	Año	Título del trabajo	Principales hallazgos utilizados
12	Long Term Plywood	2025	How is melamine particle board laminated?	Descripción técnica del proceso de laminación industrial.
13	Long Term Plywood	2025	Melamine Particle Board vs Melamine MDF	Comparativa de densidades para procesos de mecanizado.
14	Environdec	2025	EPD: Melamine faced particleboard	Certificación de impacto ambiental del tablero canteado.
15	EPD Turkey	2025	EPD for Melamine Faced MDF	Estándares de sostenibilidad para tableros de fibra.
16	UPS (Tesis)	2016	Diseño y construcción de una enchapadora	Referencia para el diseño de módulos de perfilado y corte.
17	Kollmann & Côté	1984	Principles of Wood Science and Technology	Fundamentos de la estructura celular de la madera industrial.
18	Pizzi, A.	2016	Wood Adhesives: Chemistry and Technology	Propiedades químicas de adhesivos Hot Melt (EVA/PUR).
19	Rydholm / USDA	1993	Wood Handbook	Manual de referencia para propiedades físicas de paneles.
20	Rowell, R. M.	2013	Handbook of Wood Chemistry and Composites	Interacción molecular entre adhesivos y fibras de madera.
21	Youngquist, J.	1999	Wood-based Materials and Structures	Análisis estructural de los compuestos de madera.
22	Hill, C. A. S.	2006	Wood Modification	Técnicas de tratamiento para mejorar la adhesión superficial.
23	Hunt, C. G.	1974	Wood Adhesion and Adhesives	Teorías de anclaje mecánico en la adhesión de cantos
24	Int. Trade Centre	2017	Wood Product Standards and Quality	Normas de calidad para la exportación de tableros.

N°	Autores	Año	Título del trabajo	Principales hallazgos utilizados
25	FPL (USDA)	2010	Wood Composites	Clasificación y uso de paneles de partículas y fibras.
26	Sonae Arauco	2020	General recommendations for MFC	Guía de mantenimiento y limpieza de paneles melamínicos.
27	Fraunhofer	2021	Melamine faced panels overview	Innovaciones en procesos de laminado y decorativos
28	PMC / Aguilera	2018	Melamine surface finish studies	Aplicación de sensores ópticos en el control de calidad
29	Globaldis	2025	Melamine faced board specifications	Especificaciones técnicas de espesores y tipos de canto.
30	Rocplex	2025	Melamine faced MDF board	Aplicaciones y ventajas del MDF sobre otros sustratos.
31	Pasantez, E.	2022	Herramienta para colocar canto en talleres	Análisis de la problemática del enchapado manual en PYMES.
32	Morocho & Tasintuña	2016	Diseño de una enchapadora de canto	Implementación de sistemas de control PID en el calderín.
33	UrsaImport	2025	Máquinas pegadoras de canto	Referencia comercial sobre capacidades de equipos industriales.
34	Arauco	2015	Cómo colocar tapacantos	Guía de procesos de acabado y corrección de bordes.
35	Revista M&M	2017	Mantenimiento del encolador	Protocolos para evitar la carbonización del adhesivo Hot Melt.
36	WEHO Machinery	2024	Materiales para enchapadoras de cantos	Compatibilidad de adhesivos con PVC, ABS y melamina.
37	Ayrılmış, N.	2012	Enhancement of dimensional stability	Uso de residuos melamínicos para mejorar tableros MDF.

N°	Autores	Año	Título del trabajo	Principales hallazgos utilizados
38	Başboğa, İ. H.	2023	Utilization of waste melamine paper	Reciclaje de papel melamínico como adhesivo estructural.
39	Anisuzzaman et al.	2014	Performance of MUF particleboard	Desempeño de resinas melamínicas frente a humedad y flexión.
40	Zhang, J. et al.	2018	Formaldehyde emission of wood-based panels	Revisión de normativas globales sobre emisiones de gases.

Nota. Fuente: Autor Propia.

Capítulo III

Diseño e Implementación

Diseño conceptual

En este capítulo se presenta el desarrollo del diseño e implementación de la máquina enchapadora de cantos semiautomática, partiendo desde el diseño conceptual hasta la construcción física del prototipo.

El proceso de diseño se fundamenta en la metodología VDI 2206, integrando los sistemas mecánico, eléctrico y de control, y utilizando herramientas como el QFD (Quality Function Deployment) y matrices de selección para la toma de decisiones.

La máquina ha implementarse para la empresa Novocentro Cayambe será utilizada por un operador para el enchapado de cantos en piezas rectas, irregulares y con geometrías redondeadas. En este contexto, la máquina debe cumplir con un conjunto de necesidades definidas por la empresa, las cuales establecen los criterios de calidad que debe alcanzar el sistema como se muestra en la Figura 5.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") / Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				Column #										
				Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)										
					Precisión del control de temperatura del adhesivo	Uniformidad de aplicación del adhesivo	Precisión del sistema de guiado y alineación del tablero	Precisión de posicionamiento del cabezal de trimming	Calidad geométrica de la herramienta de recorte	Precisión de corte a escuadra en end cutting	Sincronización entre avance del tablero y accionamiento de corte	Facilidad de ajuste para distintos espesores y materiales	Mantenibilidad del sistema (acceso, limpieza y ajuste)	Eficiencia del sistema de captación de residuos y resguardos de seguridad
1	9	11.9	5.0	Adhesión del canto sin fallas	⊙	⊙	○				○	○	○	
2	9	11.9	5.0	Borde preciso y alineado		○	⊙	○	○		○	○		
3	9	9.5	4.0	Acabado limpio del recorte			○	⊙	⊙		○		○	○
4	9	9.5	4.0	Corte de extremos preciso			▲			⊙	⊙		○	○
5	9	9.5	4.0	Adaptación a distintos espesores de tablero			○	⊙	○			⊙	○	
6	9	7.1	3.0	Cambios rápidos entre espesores y materiales			▲	○	▲			⊙	⊙	
7	9	9.5	4.0	Repetibilidad del proceso	○	○	⊙	⊙	○	⊙	⊙	○	○	
8	9	11.9	5.0	Confiabilidad operativa	○	○	○	○	○	○	○	○	⊙	○
9	9	7.1	3.0	Control efectivo de residuos									○	⊙
10	9	11.9	5.0	Seguridad en la operación						○	○	▲	○	⊙
				Target or Limit Value										
				Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	8	3	9	7	6	7	8	10	5
				Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
				Weight / Importance	171.4	207.1	338.1	350.0	221.4	242.9	342.9	297.6	378.6	264.3
				Relative Weight	5.1	7.4	12.0	12.4	7.9	8.6	12.2	10.6	13.5	9.4

Figura 5. Matriz QFD general del sistema de la máquina enchapadora.

La matriz QFD permite organizar y priorizar las necesidades del cliente, estableciendo su nivel de importancia dentro del proceso. A partir de este análisis, en la Tabla *2* se presentan dichas necesidades junto con su interpretación y porcentaje de importancia, los cuales sirven como base para el desarrollo del diseño de la máquina.

Tabla 2.

Necesidades del cliente e interpretación de diseño

Necesidad del cliente	Interpretación	Importancia (%)
Adhesión del canto sin fallas	El canto debe adherirse completamente al tablero sin desprendimientos ni defectos visibles	12.0
Borde preciso y alineado	El canto debe quedar perfectamente alineado con la superficie del tablero	12.4
Acabado limpio del recorte	El proceso debe eliminar excesos sin generar rebabas ni astillado	7.9
Corte de extremos preciso	Los extremos del tablero deben quedar rectos y bien definidos	13.5
Adaptación a distintos espesores de tablero	La máquina debe ajustarse a diferentes dimensiones de tablero	10.6
Cambios rápidos entre espesores y materiales	El sistema debe permitir ajustes rápidos y eficientes	7.4
Repetibilidad del proceso	El sistema debe mantener resultados constantes en múltiples ciclos	11.9
Confiabilidad operativa	La máquina debe funcionar de forma estable sin fallas frecuentes	11.9
Seguridad en la operación	El sistema debe minimizar riesgos para el operador	9.5
Control efectivo de residuos	Debe existir una correcta evacuación de residuos del proceso	9.5

Nota. Fuente Propia

A partir de los porcentajes de importancia obtenidos en la matriz QFD, se identifican como criterios más relevantes aquellos relacionados con la precisión del acabado, la calidad del corte, la adhesión del canto y la confiabilidad operativa, los cuales tienen mayor impacto en el desempeño del sistema. En función de esta priorización, el análisis se desglosa en QFD específicos por cada sistema de la máquina, permitiendo un enfoque más detallado en el desarrollo de cada módulo funcional.

Sistema de encolado (Gluing)

QFD del sistema de encolado

El sistema de encolado se analiza mediante un QFD específico como se muestra en la Figura 6 debido a su influencia directa en la calidad de adhesión del canto, siendo uno de los factores más críticos dentro del proceso de enchapado. Variables como la temperatura del adhesivo, su distribución, la dosificación y la sincronización con el avance del tablero impactan directamente en el resultado final. Por esta razón, se requiere un análisis detallado que permita traducir estas necesidades en requerimientos técnicos específicos para este módulo.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") / Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Precisión del control de temperatura	Estabilidad térmica del caldero	Uniformidad del rodillo encolador	Sistema de dosificación	Sincronización rodillo–avance del tablero	Velocidad de rotación del rodillo	Sistema de presión del canto	Capacidad del caldero	Accesibilidad para limpieza y mantenimiento	Sistema de seguridad térmica
Adhesión uniforme del canto	⊙	⊙	⊙	⊙	O	O	⊙	O	O	
Espesor adecuado de adhesivo	O	O	⊙	⊙	O	O	O			
Distribución homogénea del adhesivo	O	O	⊙	⊙	O	O	O			
Temperatura estable del adhesivo	⊙	⊙	O					⊙		
Activación rápida del sistema	O	⊙						⊙		
Compatibilidad con distintos adhesivos	⊙	⊙	O	O				⊙		
Integración con el avance del tablero			O	O	⊙	⊙	O			
Facilidad de limpieza del sistema				O					⊙	
Bajo desperdicio de adhesivo	O	O	⊙	⊙	O	O	O		O	
Seguridad térmica en operación										⊙
Target or Limit Value										
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	8	3	9	7	6	7	8	10	5
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	404.7	446.5	467.4	460.5	209.3	209.3	223.3	286.0	139.5	104.7
Relative Weight	13.7	15.1	15.8	15.6	7.1	7.1	7.6	9.7	4.7	3.5

Figura 6. Matriz QFD del sistema de encolado.

Para la selección del sistema de encolado se consideraron parámetros técnicos derivados del QFD específico del sistema, entre ellos la calidad de adhesión, el control térmico, la uniformidad de aplicación, la compatibilidad con la máquina semiautomática y la seguridad térmica. Como se muestra en la Tabla *3* el sistema Hot-Melt obtiene la mayor ponderación, debido a que ofrece una alta calidad de adhesión, mejor adaptación al enfoque semiautomático y menor complejidad constructiva e implementación en comparación con la alternativa por aire caliente

Tabla 3.

Selección del módulo del sistema de colado.

Ítem	Parámetros	Peso	Opción 1	Opción 2
			Hot-Melt	Aire Caliente
1	Calidad de adhesión	20	5	4
2	Control térmico	15	5	4
3	Uniformidad	15	4	3
4	Compatibilidad	15	5	3
5	Mantenimiento	10	4	3
6	Seguridad	10	4	3
7	Costo	10	4	2
8	Complejidad	5	4	2
	Ponderación		455	325

Nota. Fuente Propia.

Para la aplicación del adhesivo se consideraron las alternativas de rodillo encolador y boquilla aplicadora. El rodillo encolador permite una distribución más uniforme del adhesivo, un mejor control del espesor aplicado y una integración más adecuada con el avance del tablero, por lo que se selecciona como la opción más conveniente para el sistema de encolado según el análisis en la Tabla *4*.

Tabla 4.

Selección del submódulo de aplicación del adhesivo.

Opciones	Uniformidad	Control	Mantenimiento	Integración	Orden
Rodillo encolador	Alta	Alta	Alta	Alta	1
Boquilla aplicadora	Media	Media	Media	Media	2

Nota. Fuente Propia

Para la preparación del adhesivo se analizaron las alternativas de caldero térmico y cartucho térmico. El caldero térmico permite una mejor capacidad de calentamiento, una alimentación continua del adhesivo y una integración más adecuada con el sistema de aplicación mediante rodillo como se indica en la Tabla *5*, por lo que se selecciona como la alternativa más adecuada para el sistema Hot-Melt.

Tabla 5.

Selección del submódulo de preparación del adhesivo.

Opciones	Capacidad térmica	Continuidad	Integración	Costo	Orden
Caldero térmico	Alta	Alta	Alta	Medio	1
Cartucho térmico	Media	Baja	Media	Bajo	2

Nota. Fuente Propia

Para el control de temperatura del adhesivo se analizaron las alternativas de controlador PID y termostato convencional. El controlador PID ofrece mayor precisión y estabilidad térmica como lo muestra la **Tabla *6***, lo cual resulta fundamental para mantener el adhesivo Hot-Melt dentro del rango de trabajo requerido y asegurar una correcta aplicación durante el proceso de enchapado.

Tabla 6.

Selección del submódulo de control de temperatura.

Opciones	Capacidad térmica	Continuidad	Integración	Costo	Orden
Controlado PID	Alta	Muy Alta	Alta	Medio	1
On-Off	Media	Media	Alta	Bajo	2

Nota. Fuente Propia

Para el accionamiento del sistema de gluing se analizaron tres alternativas: transmisión directa, transmisión mediante banda-polea y motorreductor con transmisión banda-polea y acople de cadena-catalina. La última alternativa presenta una mayor capacidad de transmisión de potencia y una mejor sincronización del movimiento del rodillo encolador, por lo que se selecciona como la opción más adecuada para el sistema motriz del encolado como se indica en la Tabla 7.

Tabla 7.

Selección del sistema motriz del sistema de colado.

Opciones	Potencia	Complejidad	Sincronización	Costo	Orden
Motor Reductor cadena-catalina, banda polea	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Medio	1
Motor banda-Polea	Alta	Media	Alta	Medio	2
Motor Directo	Media	Baja	Media	Bajo	3

Nota. Fuente Propia

Para el sistema de presión del canto se analizaron las alternativas de rodillos de presión y zapata de presión. Los rodillos de presión permiten un contacto más uniforme entre la cinta

de canto y el tablero, además de adaptarse mejor al avance continuo del proceso, por lo que se seleccionan como la alternativa más adecuada para el sistema de colado según la Tabla *8*.

Tabla 8.

Sistema de presión del canto.

Opciones	Uniformidad	Adaptación	Mantenimiento	Contacto	Orden
Rodillos	Alta	Alta	Alta	Alta	1
Zapata	Media	Media	Media	Media	2

Nota. Fuente Propia

Sistema de recorte (Trimming)

QFD del sistema de recorte

El sistema trimming tiene como función eliminar el excedente de material de la cinta de canto, asegurando un acabado alineado con las superficies del tablero. Este proceso requiere alta precisión, estabilidad estructural y capacidad de adaptación a variaciones en el espesor del material. En este contexto, se elabora una matriz QFD como se muestra en la Figura 7 específica para el sistema de trimming, con el fin de identificar los parámetros técnicos que influyen en la calidad del recorte y el acabado final del producto.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") / Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Precisión de posicionamiento del cabezal superior	Rigidez estructural del sistema	Precisión del sistema de guiado vertical	Calidad y tipo de herramienta de corte	Velocidad de rotación del husillo	Sistema de seguimiento de perfil	Sistema de presión	Alineación entre cabezal superior e inferior	Potencia del motor de fresado	Sistema de protección y extracción de residuos
Recorte preciso del exceso de canto	⊙	⊙	⊙	⊙	O	⊙	O	⊙	O	
Acabado superficial limpio (sin rebabas ni astillado)	O	O	O	⊙	⊙	⊙	O	O	O	O
Alineación perfecta con el tablero	⊙	⊙	⊙	O		⊙	O	⊙		
Alineación perfecta con el tablero	O	O	O	O				⊙	O	
Adaptación a variaciones de espesor	⊙	O	⊙			⊙	⊙	O		
Estabilidad durante el proceso de fresado	O	⊙	O	O	O	O	O	O	O	
Repetibilidad del recorte	⊙	⊙	⊙	O	O	⊙	O	⊙	O	
Alta productividad (una sola pasada)	O	O	O	O	⊙			O	⊙	
Bajo desgaste de herramienta				⊙	⊙	O			O	
Seguridad en el sistema de corte		O								⊙
Target or Limit Value										
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	8	3	9	7	6	7	8	10	5
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	500.0	546.7	500.0	413.3	340.0	533.3	246.7	500.0	260.0	133.3
Relative Weight	12.6	13.8	12.6	10.4	8.6	13.4	6.2	12.6	6.5	3.4

Figura 7. Matriz QFD del sistema de recorte.

Para la selección del sistema de recorte se consideraron parámetros relacionados con la precisión, productividad, adaptación al perfil del tablero, calidad del acabado y estabilidad del sistema, en correspondencia con el QFD específico del trimming. La alternativa de doble unidad de fresado presenta la mayor ponderación como lo muestra en la Tabla *9* , ya que permite realizar el recorte superior e inferior en una sola pasada, mejora la adaptación a variaciones de espesor y asegura un acabado más uniforme. Aunque su complejidad constructiva y costo son mayores, su desempeño global resulta superior, por lo que se selecciona el sistema de doble unidad de fresado.

Tabla 9.

Selección del sistema de recorte.

Ítem	Parámetros	Peso	Opción 1	Opción 2
			Doble fresado	Una unidad
1	Precisión	20	5	3
2	Productividad	15	5	3
3	Adaptación	15	5	3
4	Acabado	15	5	3
5	Estabilidad	10	4	3
6	Variación espesor	10	5	2
7	Seguridad	5	4	3
8	Complejidad	5	3	4
9	Costo	5	3	5
	Ponderación		455	305

Nota. Fuente Propia.

Para la unidad de fresado inferior se evaluaron configuraciones fija y regulable. Se selecciona la configuración fija como se muestra en la Tabla *10* debido a que la referencia inferior del tablero respecto a las guías de apoyo se mantiene constante durante el proceso, por lo que el recorte inferior no requiere compensar variaciones de espesor.

Tabla 10.

Selección del submódulo de la unidad de fresado inferior.

Opciones	Precisión	Estabilidad estructural	Simplicidad mecánica	Costo	Orden
Unidad de fresado fija	Alta	Alta	Alta	Bajo	1
Unidad de fresado regulable	Media	Media	Media	Medio	2

Nota. Fuente Propia

De la Tabla *11* se tiene que el cabezal superior móvil permite que la unidad de fresado se adapte al perfil del tablero durante el proceso de recorte, mejorando la estabilidad del contacto y la precisión del sistema.

Tabla 11.

Selección del submódulo del cabezal superior.

Opciones	Adaptación	Estabilidad	Precisión	Complejidad	Orden
Cabezal móvil	Alta	Alta	Alta	Media	1
Cabezal fijo	Media	Media	Media	Baja	2

Nota. Fuente Propia

De la Tabla *12* se tiene que el rodamiento seguidor permite mantener una referencia constante con la superficie del tablero, lo que mejora la precisión del seguimiento y la estabilidad del recorte.

Tabla 12.

Selección del submódulo de seguimiento de perfil.

Opciones	Precisión	Adaptación	Estabilidad	Integración	Orden
Rodamiento seguidor	Alta	Alta	Alta	Alta	1
Guía simple	Media	Baja	Media	Alta	2

Nota. Fuente Propia

Como se muestra en la Tabla *13* el sistema de resortes permite mantener una presión constante del cabezal superior sobre el tablero, facilitando la adaptación a variaciones del material.

Tabla 13.

Selección del sistema de presión de recorte.

Opciones	Adaptación	Constancia	Simplicidad	Costo	Orden
Resortes de compresión	Alta	Alta	Media	Bajo	1
Sistema rígido	Baja	Media	Baja	Bajo	2

Nota. Fuente Propia

Según la Tabla *14* el uso de dos barras guía proporciona mayor estabilidad estructural y precisión en el desplazamiento vertical del cabezal superior.

Tabla 14.

Selección del sistema de guiado vertical.

Opciones	Precisión	Estabilidad	Ajuste	Complejidad	Orden
Doble barra guía	Alta	Alta	Alta	Media	1
Guía simple	Media	Media	Media	Baja	2

Nota. Fuente Propia

De la **Tabla *15*** la unidad de mayor potencia proporciona mayor estabilidad durante el proceso de corte y mejor capacidad para trabajar de forma continua.

Tabla 15.

Selección de la unidad de fresado comercial.

Opciones	Potencia	Velocidad	Disponibilidad	Costo	Orden
Router 1000-1200WW	Alta	Alta	Media	Medio	1
Router 600-800 W	Media	Alta	Alta	Bajo	2

Nota. Fuente Propia

Para la herramienta de corte se analizaron una fresa recta de carburo y una fresa como se muestra en la Tabla *16* con rodamiento tipo *flush trim*. Se selecciona la fresa recta de carburo, ya que resulta más adecuada para remover el excedente superior e inferior del canto en el sistema propuesto. En cambio, la fresa *flush trim* con rodamiento se emplea principalmente en operaciones de copiado o seguimiento lateral de perfiles.

Tabla 16.

Selección de herramienta de corte.

Opciones	Precisión	Compatibilidad	Disponibilidad	Reemplazo	Orden
Fresa recta de carburo	Alta	Alta	Alta	Alta	1
Fresa flush trim	Media	Media	Alta	Media	2

Nota. Fuente Propia

Sistema de corte de extremos (End Cutting)

QFD del sistema de corte de extremos

El sistema de corte de extremos permite realizar el corte de la cinta de canto al inicio y final del tablero, siendo un elemento clave para garantizar la terminación del proceso de enchapado. Este sistema debe operar de manera sincronizada con el avance del material, asegurando cortes precisos y rápidos sin afectar la continuidad del proceso. Para ello, se desarrolla una matriz QFD como se indica en la Figura 8 específica que permite definir los requerimientos técnicos asociados al mecanismo de corte y su sistema de accionamiento.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") / Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Precisión del mecanismo de corte	Rigidez estructural del sistema de corte	Rigidez estructural del sistema de corte	Velocidad de accionamiento del actuador neumático	Precisión del sensor de detección	Tiempo de respuesta del sistema	Sincronización con el avance del tablero	Tipo y calidad de la cuchilla	Tipo y calidad de la cuchilla	Sistema de seguridad del módulo
Corte preciso y perpendicular del canto	⊙	⊙	O	O	O	O	⊙	⊙	⊙	
Corte limpio sin deformación del material	⊙	O	O	O				⊙	O	
Sincronización con el avance del tablero	O		O		O	⊙	⊙			
Activación automática en el final del tablero			O		⊙	⊙	O			
Repetibilidad del corte	⊙	⊙	O	O	⊙	⊙	⊙	O	O	
Tiempo de respuesta rápido			⊙	O	O	⊙	O			
No interferencia con el avance del material	O	O	⊙	O		O	⊙		O	
Bajo desgaste del sistema de corte				O				⊙		
Confiabilidad del sistema de detección					⊙	⊙	O			
Seguridad en el proceso de corte		O								⊙
Target or Limit Value										
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	8	3	9	7	6	7	8	10	5
Max Relationship Value in Column	9	9	9	3	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	360,0	293,3	320,0	173,3	373,3	520,0	466,7	293,3	193,3	100,0
Relative Weight	11,6	9,5	10,3	5,6	12,1	16,8	15,1	9,5	6,3	3,2

Figura 8. Matriz QFD del sistema de corte de extremos.

Para la selección del sistema de corte de extremos se consideraron parámetros vinculados con la calidad del corte, la rapidez de accionamiento, la sincronización con el avance del tablero, la confiabilidad operativa y la facilidad de integración mecánica. La guillotina accionada neumáticamente obtiene la mayor ponderación como se muestra en la Tabla *17*, debido a su rápida respuesta, menor complejidad constructiva y mejor adaptación al proceso semiautomático propuesto. Por lo tanto, se selecciona la guillotina accionada neumáticamente como la alternativa más conveniente para el sistema end cutting.

Tabla 17.

Selección del sistema de corte de extremos.

Ítem	Parámetros	Peso	Opción 1	Opción 2
			Doble fresado	Una unidad
1	Calidad	20	5	4
2	Rapidez	15	5	3
3	Sincronización	15	5	3
4	Confiabilidad	15	5	3
5	Seguridad	10	4	3
6	Integración	10	5	3
7	Complejidad	10	4	2
8	Costo	5	5	3
	Ponderación		480	310

Nota. Fuente Propia.

Para el accionamiento del mecanismo de corte se analizaron actuadores lineales neumáticos y eléctricos. El actuador lineal neumático proporciona una respuesta rápida como lo muestra la Tabla *18*, una fuerza adecuada para ejecutar el corte y una integración sencilla con el sistema mecánico.

Tabla 18.

Selección del accionamiento del sistema de corte de extremos.

Opciones	Rapidez	Fuerza	Integración	Costo	Orden
Actuador neumático	Alta	Alta	Media	Bajo	1
Actuador eléctrico	Media	Media	Media	Medio	2

Nota. Fuente Propia

Para el arrastre de la cinta de canto se analizaron un sistema compuesto por rodillo motriz y rodillo opresor, y un sistema de fricción simple. La configuración con rodillo motriz y rodillo opresor permite un mejor control del avance de la cinta y una mayor estabilidad durante la operación como lo muestra la Tabla *19*.

Tabla 19.

Selección del sistema de arrastre de cinta.

Opciones	Control	Estabilidad	Simplicidad	Confiabilidad	Orden
Rodillo motriz + opresor	Alta	Alta	Media	Alta	1
Fricción simple	Media	Media	Alta	Media	2

Nota. Fuente Propia

Para la detección de la presencia del tablero se analizaron sensores de contacto y sensores ópticos como se muestra en la Tabla *20*. El sensor de contacto permite una activación directa y confiable de la secuencia del sistema end cutting, ya que al detectar el tablero habilita el arrastre de la cinta y, al dejar de detectarlo, activa la guillotina y separa el sistema de arrastre.

Tabla 20.

Selección del sistema de detección del tablero.

Opciones	Precisión	Integración	Implementación	Confiabilidad	Orden
Sensor de contacto	Alta	Alta	Alta	Alta	1
Sensor óptico	Media	Media	Media	Media	2

Nota. Fuente Propia

A partir del análisis realizado mediante las matrices QFD y las tablas de selección ponderadas, se definió la configuración final de módulos y submódulos que conforman la máquina enchapadora de cantos como se muestra en la Tabla *21*. La selección de cada componente responde a criterios de desempeño, precisión, confiabilidad y compatibilidad con el enfoque semiautomático del sistema, garantizando así un diseño funcional y técnicamente sustentado.

Tabla 21.

Resumen de módulos y submódulos para cada sistema.

Sistema	Módulo	Submódulo seleccionado
Sistema de encolado (Gluing)	Tipo de encolado	Hot-Melt
	Aplicación de adhesivo	Rodillo encolador
	Preparación del adhesivo	Caldero térmico
	Control de temperatura	Controlador PID
	Sistema motriz	Motor reductor con transmisión banda–polea y cadena
	Sistema de presión	Rodillos de presión
	Configuración del sistema	Doble unidad de fresado
	Unidad inferior	Fija sobre base estructural
	Cabezal superior	Móvil con seguimiento de perfil
Sistema de recorte (Trimming)	Seguimiento de perfil	Rodamiento seguidor
	Sistema de presión	Resortes de compresión
	Guiado vertical	Doble barra de guiado
	Unidad de fresado	Router industrial 1000–1200 W
	Herramienta de corte	Fresa recta de carburo
	Tipo de corte	Guillotina neumática
Sistema de corte de extremos (End Cutting)	Accionamiento	Actuador lineal neumático
	Sistema de arrastre	Rodillo motriz con rodillo opresor
	Sistema de detección	Sensor de contacto

Nota. Fuente Propia

Diseño conceptual

La Figura 9 presenta el concepto final del sistema de enchapado de cantos desarrollado, en el cual se integran los subsistemas de encolado, recorte (trimming) y corte de extremos (end cutting) dentro de una estructura funcional única. El proceso inicia con el ingreso

del tablero, seguido de la aplicación del adhesivo mediante el sistema Hot-Melt, donde el rodillo encolador distribuye el material de forma uniforme sobre la superficie del canto. Posteriormente, el sistema de presión mediante rodillos garantiza la correcta adherencia entre el canto y el tablero.

A continuación, el sistema de recorte elimina el excedente superior e inferior del material mediante una configuración de doble unidad de fresado, compuesta por un cabezal inferior fijo y un cabezal superior móvil con seguimiento de perfil, lo que permite adaptarse a variaciones en el espesor del tablero y asegurar un acabado uniforme. Finalmente, el sistema de corte de extremos realiza la separación del material mediante una guillotina accionada neumáticamente, sincronizada con el avance del tablero y controlada mediante un sensor de contacto.

La integración de estos sistemas permite obtener un proceso continuo, preciso y confiable, adecuado para el enchapado de piezas rectas e irregulares, cumpliendo con los requerimientos establecidos en el diseño.

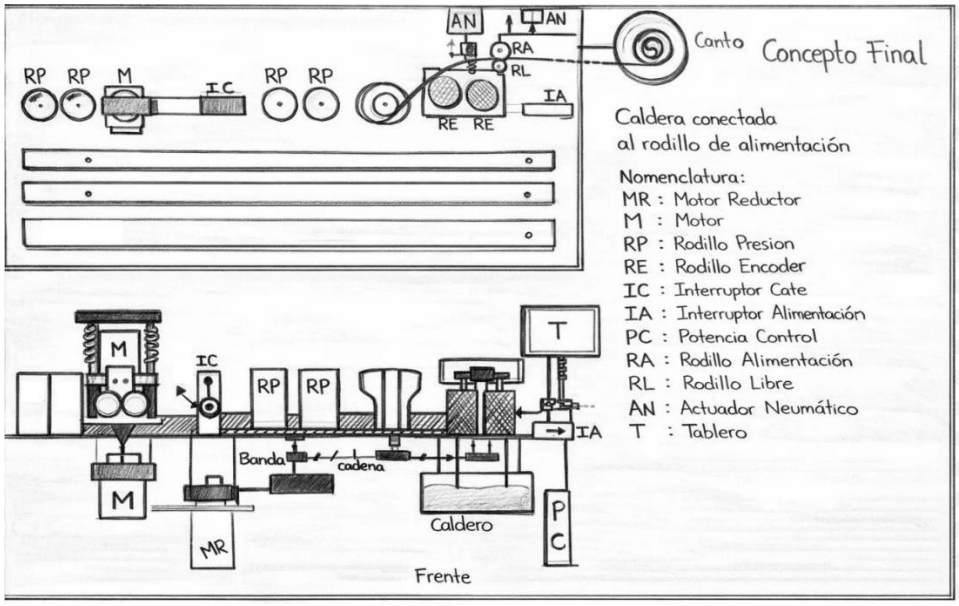


Figura 9. Diseño conceptual para la máquina enchapadora de cantos.

Diseño mecánico

El diseño mecánico de la máquina enchapadora de cantos parte del concepto final definido en la etapa anterior, el cual establece una configuración de tres módulos funcionales en serie: encolado, recorte y corte de extremos. El desarrollo que sigue tiene como propósito dimensionar y seleccionar los componentes mecánicos de cada subsistema a partir de criterios de resistencia, rigidez y vida útil, respaldados por cálculos analíticos y normas de ingeniería.

Parámetros de operación

Antes de proceder al dimensionamiento de los componentes, se establece el conjunto de parámetros operativos que definen las condiciones de trabajo de la máquina como se muestra en la Tabla *22*. Estos valores se obtienen a partir de los requerimientos definidos en el diseño conceptual, de los datos técnicos proporcionados por la empresa Novocentro Cayambe y de los materiales de tapacanto disponibles en el mercado nacional.

Tabla 22.

Parámetros de operación de la máquina enchapadora

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad de diseño del tapacanto	v	5	m/min
Espesor del panel (máx.)	e_p	36	mm
Espesor del panel (mín.)	e_p	9	mm
Ancho del panel (máx.)	b_p	600	mm
Ancho del tapacanto (variable)	a_t	10 - 50	mm
Temperatura de operación hot melt	T_{op}	150 - 200	°C
Presión neumática de trabajo	P_{neum}	6	bar
Factor de seguridad de diseño	FS	3	-

Nota. Fuente propia, basado en requerimientos operativos de Novocentro Cayambe.

El ancho del tapacanto es un parámetro variable que depende del espesor del panel a procesar. La máquina trabaja con la totalidad de los anchos comercialmente disponibles en el

mercado nacional, siendo 50 mm el ancho máximo, utilizado en paneles de hasta 45 mm de espesor. El sistema de guiado, el calderín y el rodillo encolador se dimensionan para este ancho máximo; para anchos menores, el ajuste se realiza mediante guías laterales regulables. La Tabla *23* resume la correspondencia entre espesor de panel y ancho de tapacanto recomendado.

Tabla 23.

Anchos comerciales de tapacanto según espesor de panel

Espesor del panel (mm)	Ancho de tapacanto recomendado (mm)
9 – 12	15 – 18
15 – 18	22 – 25
25 – 30	30 – 35
36 – 45	40 – 50

Nota. Fuente propia, basado en catálogo de distribuidores nacionales de insumos para mueblería.

En la **Tabla 24** se presenta las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 tomadas de “Steel Construction Manual”

Tabla 24.

Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Límite de fluencia	S_y	250	MPa
Resistencia a la tracción	S_{ut}	400	MPa
Módulo de elasticidad	E	200	GPa
Densidad	ρ	7 850	kg/m³

Nota. Adaptado de Steel Construction Manual por American Institute of Steel Construction (2017).

Diseño del sistema Gluing

Para este sistema, vamos a ir dividiendo en varios subsistemas, estos siendo el sistema de encolado y caldera y sistema de arrastre del rollo de cinta de canto.

Subsistema encolado y caldera.

Este subsistema no lo diseñaremos, por motivo de que la empresa nos facilitó un módulo de encolado de una maquinaria antigua en desuso, para lo cual este fue nuestro pilar tanto para el diseño posterior del sistema de transmisión de potencia como para dimensionamiento de la mesa de soporte y medidas específicas para que los demás sistemas se acoplen perfectamente entre ellos.

Subsistema de transmisión de potencia banda polea.

El sistema de transmisión de potencia del módulo de encolado tiene como función transferir el movimiento del motorreductor hacia el rodillo motriz, garantizando una velocidad constante de avance del tapacanto. Para el dimensionamiento se parte de la velocidad lineal de diseño establecida en la Tabla 22: $v = 5\ m/\ min$ y de la velocidad angular de trabajo del sistema: $n = 48\ rpm$

Despejando el diámetro efectivo del rodillo motriz

$$D = \frac{v}{\pi * n} \quad (1)$$

$$D = \ 33.16\ mm$$

Por lo tanto el radio efectivo del rodillo es de 16.58 mm

Para calcular el torque requerido sobre el rodillo motriz hacemos uso de la fuerza de arrastre $F_{arrastre} = 20\ N$

$$T = F * r \quad (2)$$

$$T = \ 0.332\ N$$

Teniendo ya el torque requerido, se calcula la potencia que se necesita en el eje motriz, teniendo lo siguiente

$$P = \frac{2 * \pi * n * T}{60} \quad (3)$$

$$P = 1.67\ W$$

Para fines de seguridad se aplica un factor de diseño de $Fs = 3$

$$P_{diseño} = 5.01\ W$$

Debido a que comercialmente no existen motorreductores industriales de potencia tan baja y se requiere estabilidad de velocidad, capacidad de arranque y reserva de torque, se selecciona un motorreductor comercial de $P_{motor} = 40\ W$ con velocidad de salida aproximada de 48 rpm.

Dado que la potencia es baja, se selecciona una banda de sección clásica o síncrona para mantener la relación 1:1 y la velocidad de 48 rpm en el eje del rodillo

Subsistema de transmisión de potencia banda polea.

A partir por el piñón del módulo de encolado anteriormente mencionado este cuenta con un piñón de 21 dientes y con el paso de la cadena comercial de 12.7 mm se calcula la fuerza transmitida por la cadena en donde se tiene

Fuerza tangencial total del motor que ejerce sobre el piñón motriz (F)

$$Pot = V * F \quad (4)$$

Donde la fuerza está Newton, la Potencia está en Watts y la velocidad en m/s

$$F = \frac{40\ watt}{0.0833\ m/s}$$

$$F = 480.19\ N$$

Nota: Esta es la fuerza máxima teórica que el motor puede ejercer en el sistema de transmisión.

$$F_{cadena_max} = 480.19\ N$$

Subsistema de arrastre del rodillo de cinta de canto

Este subsistema es el encargado de permitir el ingreso de la cinta de canto hacia el sistema de corte y el encolado. Para lo que calcularemos los elementos críticos que intervienen en su correcto funcionamiento.

Diseño del eje del rodillo motriz.

El eje del rodillo motriz tiene como función transmitir el torque proveniente del sistema cadena–catalina hacia el rodillo encargado del arrastre del tapacanto. El esfuerzo principal actuante sobre el eje corresponde a torsión debido a la fuerza transmitida por la cadena.

Para propósitos de cálculo se toma el eje de arrastre como elemento principal, ya que los demás ejes se diseñarán de la misma manera por lo que están sometidos a la misma fuerza que ejerce la cadena.

El ángulo de fuerza F que se forma entre la cadena con respecto al eje Y-Z es de 30° como se muestra en la Figura 10, por lo que se tiene los siguientes cálculos

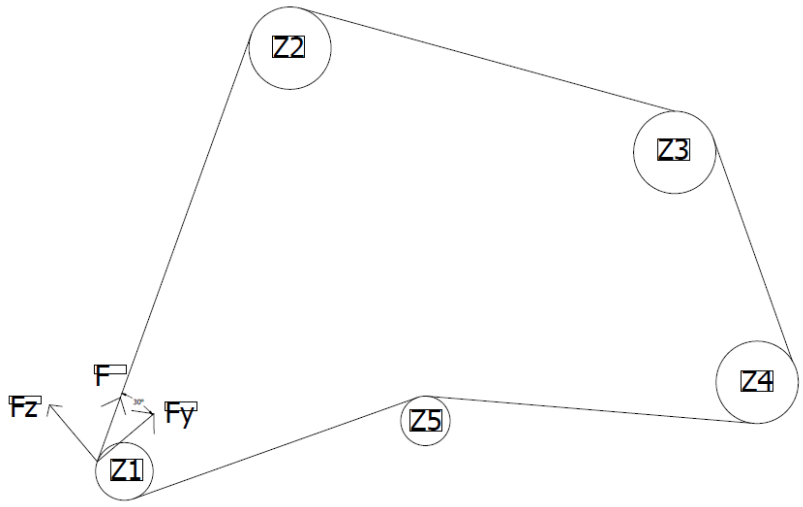


Figura 10. Posición de los piñones y descomposición de la Fuerza sobre el eje de arrastre

$$Fy_{eje_arrastre} = F * cos\ 30°$$

$$Fy_{eje_arrastre} = 480.19 * cos\ 30°$$

$$\boldsymbol{Fy_{eje_arrastre} = 418.85\ N}$$

$$Fz_{eje_arrastre} = F * sen\ 30°$$

$$Fz_{eje_arrastre} = 480.19 * sen\ 30°$$

$$\boldsymbol{Fz_{eje_arrastre} = 240.09\ N}$$

Las fuerzas $Fy_{eje_arrastre}$ y $Fz_{eje_arrastre}$ son estas las que ejercen sobre el eje, por lo que ahora se procede a calcular el torque que el eje recibe.

Para calcular el torque se tiene de un piñón de 21 dientes que se nos facilitó por medio de la empresa, con este piñón obtenemos el diámetro primitivo que es de 75 mm, entonces:

$$T = F * D \quad (5)$$

$$T = 480.19\ N * 0.0375\ m$$

$$T = 480.19\ N * 0.0375\ m$$

$$T = 18.007\ N - m$$

Este torque es el que está presente en los piñones conducidos

Reacciones producidas en el eje

En la siguiente Figura 11 se muestra los puntos A y B en donde se van a producir las cargas en los ejes de piñones conducidos

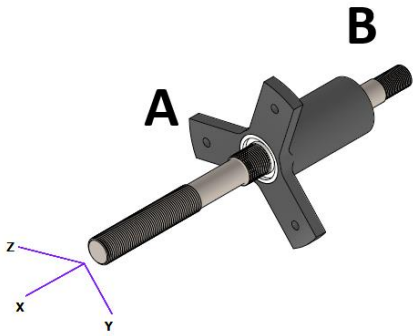


Figura 11. Cargas en los puntos A y B del eje que alberga los piñones conducidos.

La carga aplicada en el punto A son en base a las fuerzas F_y y F_z son las que ejercerá el eje con la melamina al momento de pegar. Por motivos de interés en el cálculo estos valores se toman de 100 N (valor aproximado), que será la fuerza que aplica el cuerpo al melamínico, al tapacantos y rodillo. Está fuerza es la que se aplica en el punto A donde se encuentra el rodamiento que actúa en el eje Y como en el eje Z.

Se tiene el siguiente diagrama en la Figura 12 de las fuerzas y reacciones producidas sobre el eje de arrastre

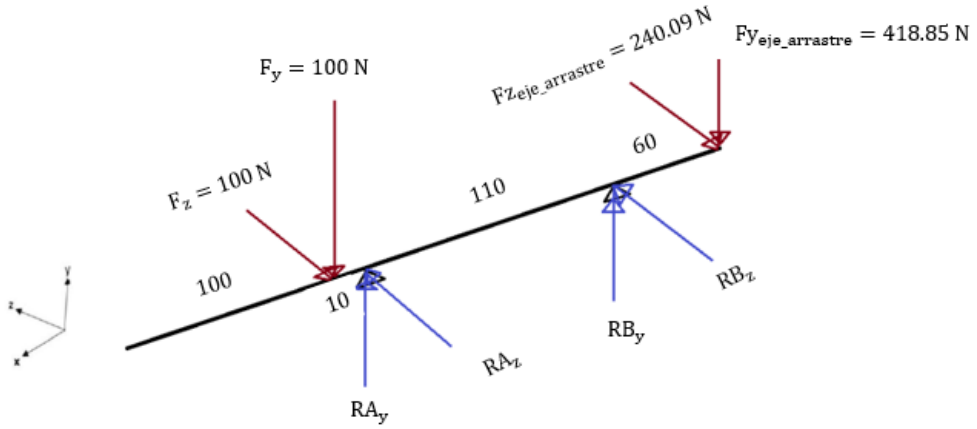


Figura 12. Diagrama de fuerzas sobre el eje de arrastre.

A continuación se tiene las fuerzas aplicadas en el eje en el plano X-Y como se muestra en la Figura 13.

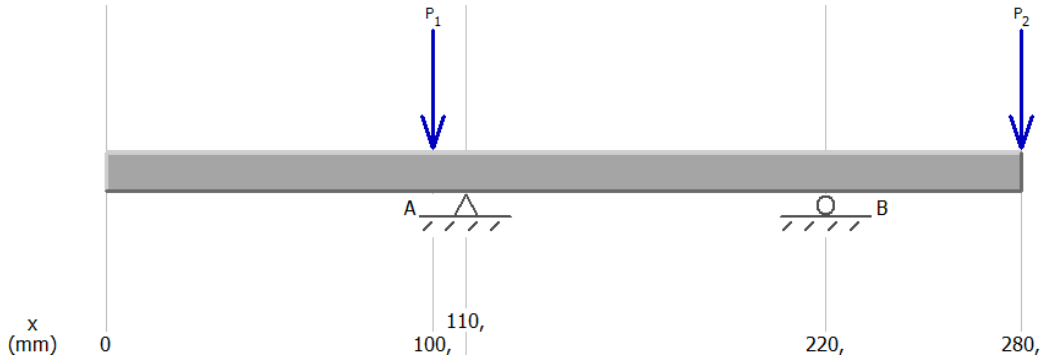


Figura 13. Cargas aplicadas en el eje (x-y).

Se hace el siguiente análisis:

$$\sum M_A = 0$$

$$(100\ N)(0.01\ m) + (0.11\ m) * Rb_y - (0.170\ m)(418.85\ N) = 0$$

$$\boldsymbol{Rb_y = 638.22\ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$100\ N\ +\ 418.85\ N\ -\ Ra_y - Rb_y = 0$$

$$\boldsymbol{Ra_y = -119.37\ N}$$

El signo es negativo por lo que la reacción se encuentra en el otro sentido

Se calcula los momentos

$$M_A = 0.01\ m\ *\ F_y$$

$$M_A = 0.01\ m\ *\ 100\ N$$

$$\boldsymbol{M_{Axy} = 1\ N - m}$$

$$M_B = 0.060\ m\ *\ Fy_{eje_arrastre}$$

$$M_B = 0.06\ m\ *\ 418.85\ N$$

$$\boldsymbol{M_{Bxy} = 25.13\ N - m}$$

En la siguiente Figura 14 se encuentra el diagrama de esfuerzo cortante y momento que se lo realizó en el software MD Solids 4.0.

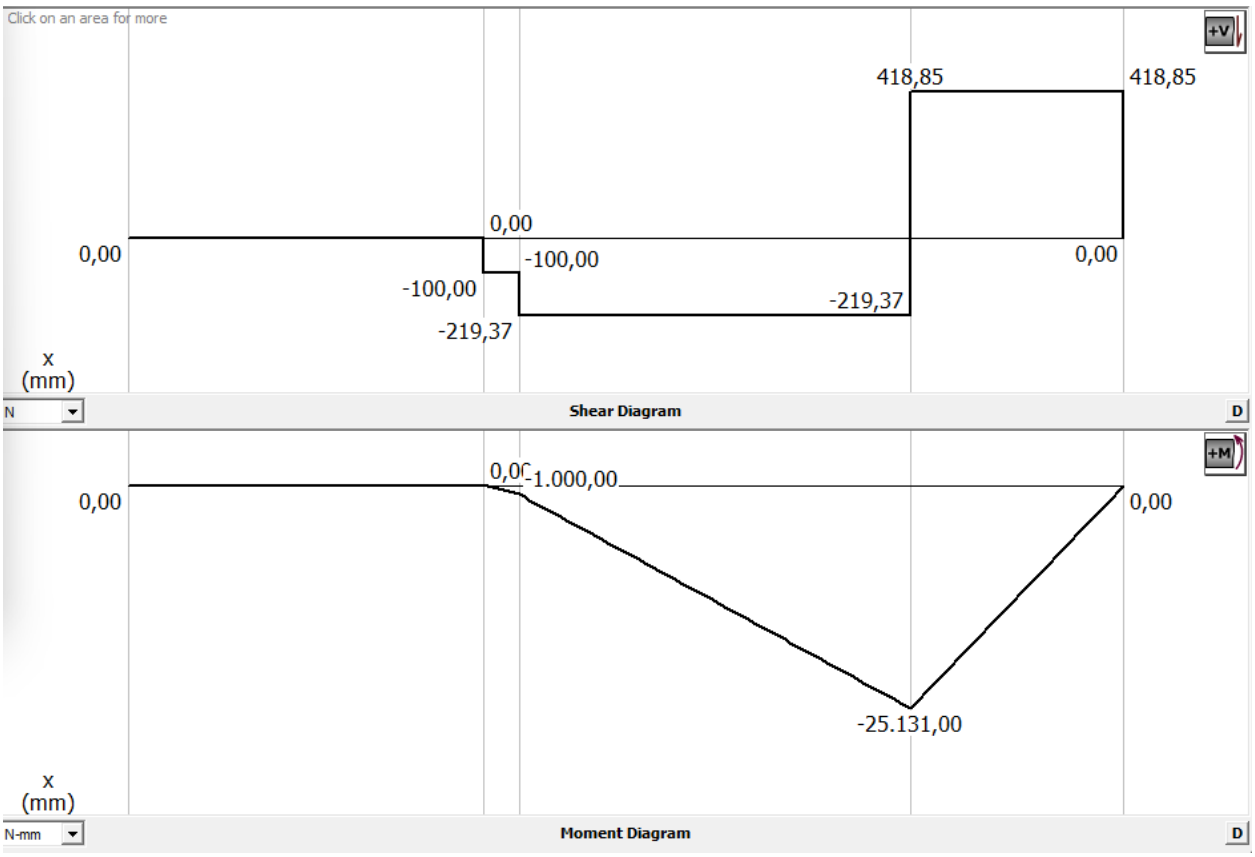


Figura 14. Diagrama de corte y momento en el plano (x-y)

A continuación se tiene las fuerzas aplicadas en el eje en el plano X-Z como se muestra en la Figura 15.

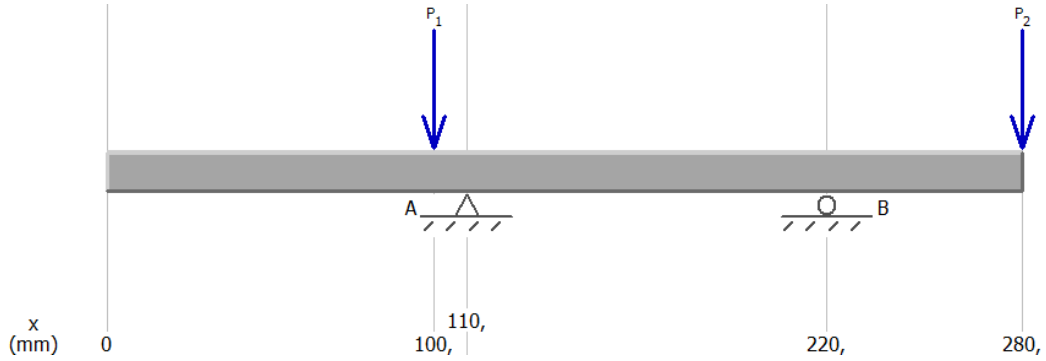


Figura 15. Cargas aplicadas en el eje (x-z)

Se hace el siguiente análisis:

$$\sum M_A = 0$$

$$(100\ N)(0.01\ m) + (0.11\ m) * Rb_z - (0.170\ m)(240.09\ N) = 0$$

$$\boldsymbol{Rb_z = 361.95\ N}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$100\ N\ +\ 240.09\ N\ -\ Ra_z - Rb_z = 0$$

$$\boldsymbol{Ra_z = -21.86\ N}$$

El signo es negativo por lo que la reacción se encuentra en el otro sentido

Se calcula los momentos

$$M_A = 0.01\ m\ *\ F_z$$

$$M_A = 0.01\ m\ *\ 100\ N$$

$$\boldsymbol{M_{Axx} = 1\ N - m}$$

$$M_B = 0.060\ m\ *\ Fz_{eje_arrastre}$$

$$M_B = 0.06\ m\ *\ 240.09\ N$$

$$\boldsymbol{M_{Bxx} = 14.40\ N - m}$$

En la siguiente Figura 16 se encuentra el diagrama de esfuerzo cortante y momento que se lo realizó en el software MD Solids 4.0.

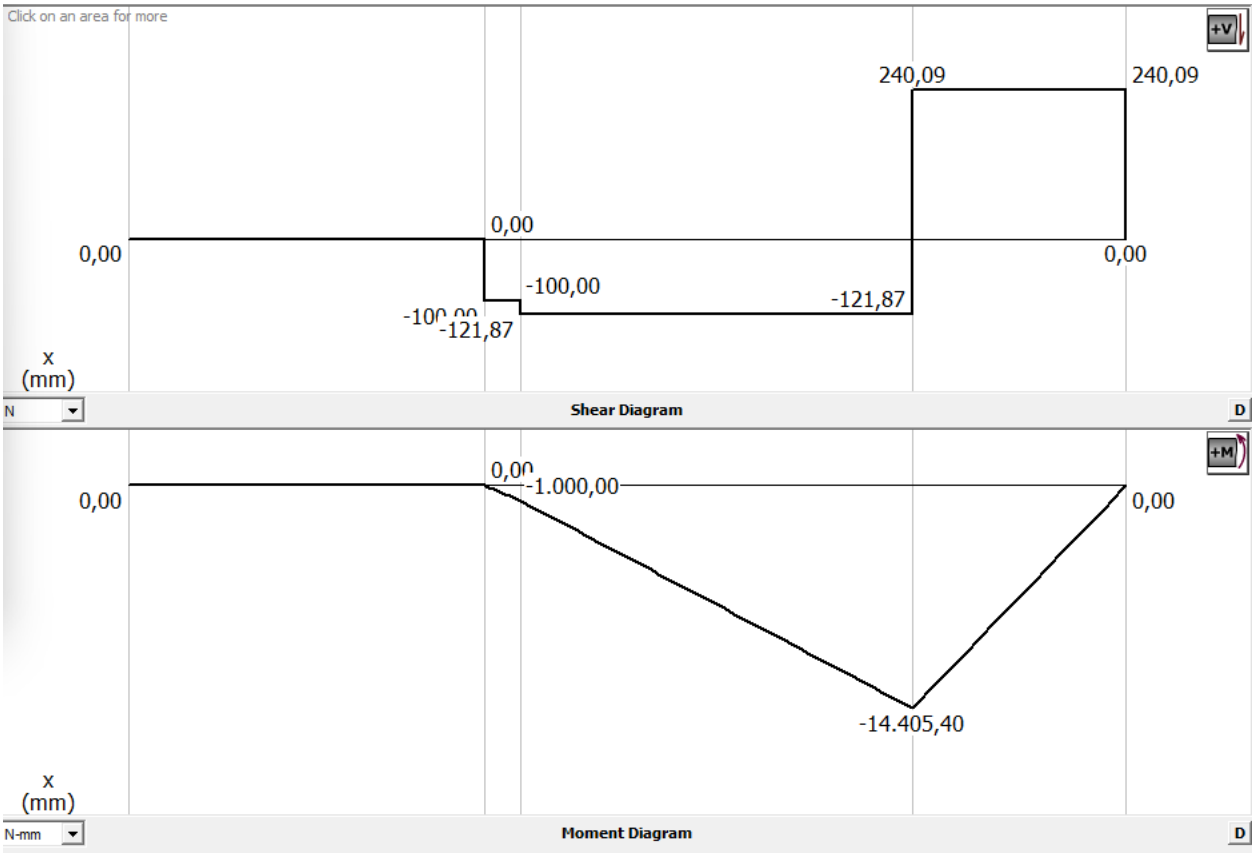


Figura 16. Diagrama de corte y momento en el plano (x-z)

Momento máximo para calcular el diámetro del eje

$$M_R = \sqrt{(M_{Bxy})^2 + (M_{Bxx})^2} \quad (6)$$

$$M_R = \sqrt{(25.13)^2 + (14.40)^2}$$

$$M_R = 28.96\ N - m$$

Para el diseño del eje se considera un eje macizo circular sometido principalmente a torsión. El diámetro mínimo se determina mediante el criterio de esfuerzo cortante máximo y el esfuerzo flexionante máximo.

Esfuerzo cortante máximo:

$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi * d^3} \quad (7)$$

Esfuerzo flexionante máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{32 * M}{\pi * d^3} \quad (8)$$

Según la teoría de fallas esfuerzo cortante y flexionante se tiene la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (9)$$

Según las propiedades del acero ASTM A36 se tiene que $S_y = 250\ Mpa$ y utilizando el factor de seguridad de $Fs = 2$, el esfuerzo cortante admisible se aproxima mediante la siguiente fórmula según (Shigley 2012).

$$\tau_{adm} = \frac{S_y}{Fs} \quad (10)$$

$$\tau_{adm} = 125\ MPa$$

Se tiene los siguientes valores para calcular el diámetro del eje, que son:

$$M_R = 28.96\ N - m$$

$$T = 18.007\ N - m$$

Estos valores se reemplazan en la ecuación (7)

$$\tau_{max} = \frac{16 * 18.007\ Nm}{\pi d^3}$$

$$\tau_{max} = \frac{91.70\ Nm}{d^3}$$

Se reemplazan en la ecuación (8)

$$\sigma_{max} = \frac{32 * 28.96\ N - m}{\pi * d^3}$$

$$\sigma_{max} = \frac{294.98\ N - m}{* d^3}$$

Una vez obtenidos los esfuerzos flexionantes y cortantes, se reemplazan en la fórmula (9).

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$125\ MPa = \sqrt{(\frac{294.98\ N - m}{d^3})^2 + 3(\frac{91.70\ Nm}{d^3})^2}$$

$$d = 0.0139\ m$$

$$d = 13.9\ mm$$

El diámetro calculado corresponde al mínimo teórico requerido para resistir el torque transmitido. Sin embargo, por criterios de fabricación, rigidez estructural, montaje y compatibilidad con rodamientos comerciales, se selecciona un diámetro comercial de $d = 20\ mm$, este diámetro es para los ejes con piñones conducidos.

Análisis CAE de las fuerzas aplicadas en los ejes de los piñones conducidos

Tensión de Von Mises máximo de 92.24 MPa

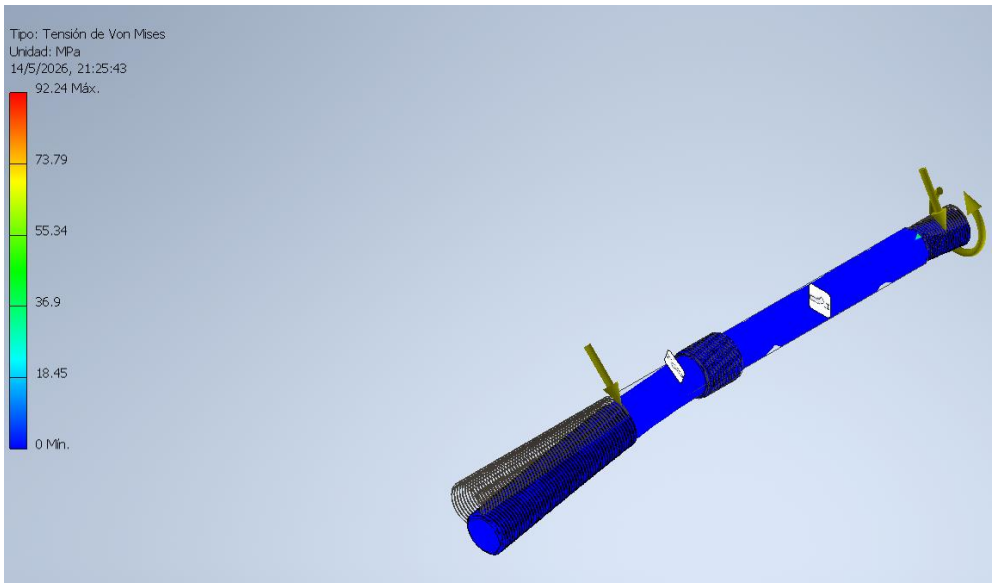


Figura 17. Resultado simulación, Tensión de Von Mises

Desplazamiento máximo de 0.02344 mm

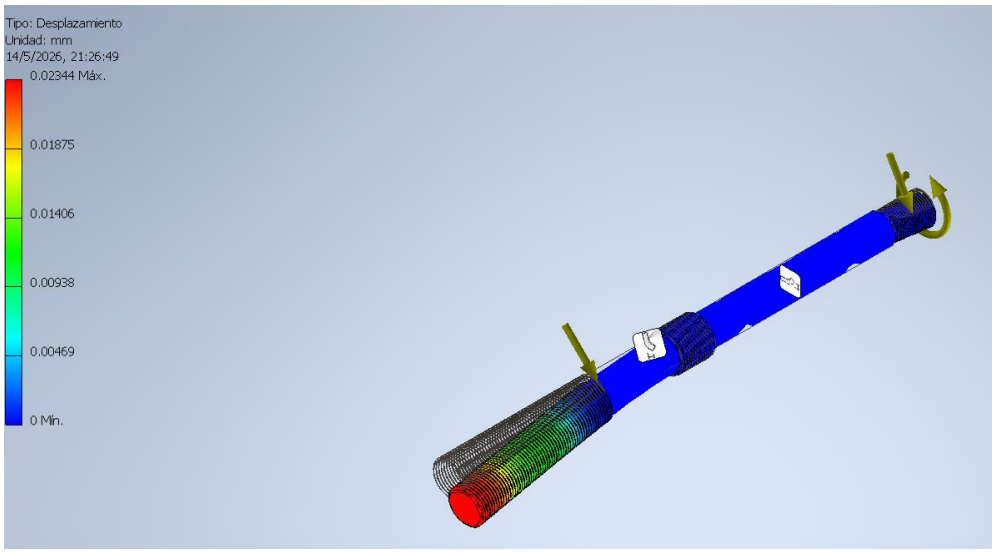


Figura 18. Resultado simulación, Desplazamiento.

El diámetro adoptado garantiza adecuada resistencia mecánica, estabilidad operacional y una mayor vida útil del sistema de transmisión del módulo de encolado.

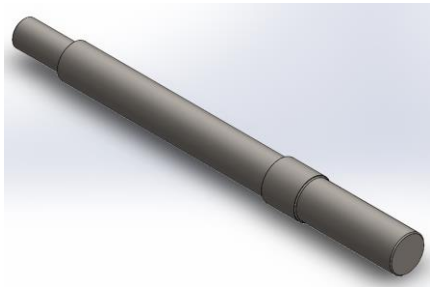


Figura 19. Eje de arrastre.

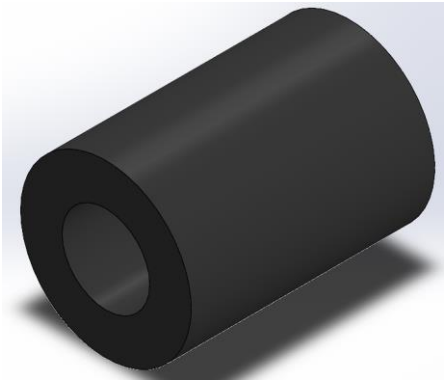


Figura 20. Rodillo de arrastre.

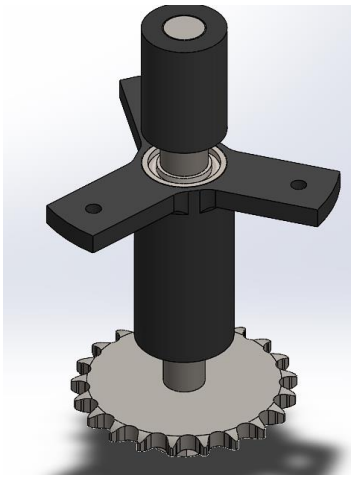


Figura 21. Ensamblaje rodillo de arrastre.

Selección de rodamientos

Para los apoyos del eje del rodillo motriz se seleccionan rodamientos de bolas de una hilera serie 6004 (d = 20 mm). La carga radial equivalente sobre cada rodamiento:

$$\mathrm{P_{rodamiento}} = \frac{\mathrm{F_{cadena_max}}}{2} \quad (11)$$

$$\mathrm{P_{rodamiento}} = \frac{480.19}{2}$$

$$\mathrm{P_{rodamiento}} = 240.09\ \mathrm{N}$$

La vida nominal L10:

$$\mathrm{L10} = \left(\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{P_{rodamiento}}}\right)^3 \times \left(\frac{10^6}{60 \times \mathrm{n}}\right) \quad (12)$$

Donde C = 9 360 N es la capacidad de carga dinámica del rodamiento 6004 (catálogo SKF) y n = 48 rpm.

$$\mathrm{L10} = \left(\frac{9360}{240.09}\right)^3 \times \left(\frac{10^6}{60 \times 48}\right)$$

$$\mathrm{L10} = (47{,}4)^3 \times 347{,}2$$

$$\mathrm{L10} = 106\,496 \times 347{,}2$$

$$\mathrm{L10} = 2{,}06 \times 10^7\ \mathrm{horas}$$

La vida calculada supera ampliamente la vida útil esperada del equipo (5 000 horas), confirmando la selección.

Diseño de subsistema prisionero para el tapacanto.

Para que el tapacanto sea arrastrado entre el rodillo de arrastre y los rodillos prisioneros, la fuerza normal de presión debe generar suficiente fricción, según (Shigley 2012) la relación entre la fuerza de fricción y fuerza norma es:

$$F_{rod,min} = \frac{F_{arrastre}}{\mu} \quad (13)$$

Donde $F_{arrastre}$ para bobinas de tapacantos de PVC varía entre (15-35 N) por lo que para el cálculo tomaremos el valor de $F_{arrastre} = 20\ N$.

$$F_{rod,min} = 57{,}1\ N$$

Fuerza de diseño en los rodillos

Tomaremos un factor de seguridad $FS = 1{,}5$

$$F_{rod,dis} = F_{rod,min} \times FS \quad (14)$$

$$F_{rod,dis} = 85{,}7\ N$$

Área efectiva del émbolo

Conforme a la norma ISO 6431:2015, el área efectiva del émbolo de un cilindro neumático de doble efecto en extensión se determina como:

$$A_e = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (15)$$

$$A_e = 314{,}16\ mm^2$$

Fuerza efectiva entregada por el SDA20×15

La norma ISO 6431:2015 establece que la fuerza efectiva de un cilindro neumático incorpora la eficiencia mecánica η que da cuenta de las pérdidas por rozamiento en las juntas y el vástago:

$$F_{SDA} = P \times A_e \times \eta \quad (16)$$

$$F_{SDA} = 160{,}2\ N$$

Fuerza transmitida a los rodillos a través de la palanca

Aplicando el principio de momentos respecto al pivote del brazo, según Beer et al. (2013), en condición de equilibrio cuasiestático.

Donde $L1 = 90.5\ mm$ y $L_2 = 137.4\ mm$ basados en el modelo CAD.

$$F_{SDA} \times L_1 = F_{rod,real} \times L_2 \quad (17)$$

$$F_{rod,real} = 105{,}4\ N$$

Verificación

$$F_{rod,real} = 105{,}4\ N \geq F_{rod,dis} = 85{,}7\ N$$

El factor de seguridad real del sistema resulta:

$$FS_{real} = \frac{F_{rod,real}}{F_{rod,min}} = 1{,}85$$

Con esto podemos validar el actuador siendo optimo implementar el actuador neumático SDA 20X15 con las siguientes especificaciones mostradas en la **Tabla *25***

Tabla 25.

Parámetros del actuador neumático SDA 20x15

Parámetro	Valor
Diámetro de émbolo	D = 20 mm
Diámetro de vástago	d = 8 mm
Carrera	s = 15 mm
Presión de operación	P = 0,6 MPa
Eficiencia mecánica	η = 0,85

Nota. Fuente Ficha técnica SDA series

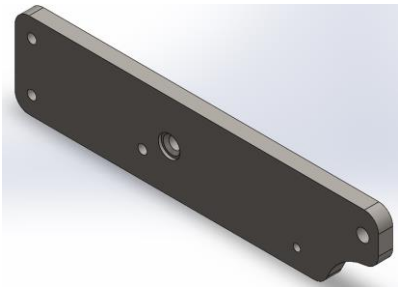


Figura 22. Basemotriz.

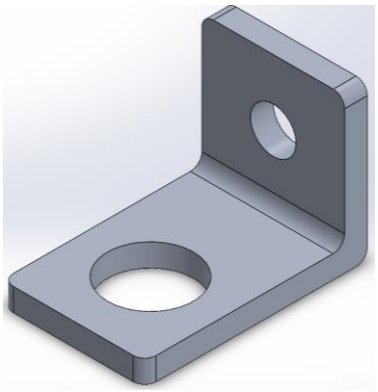


Figura 23. Acople vástago.

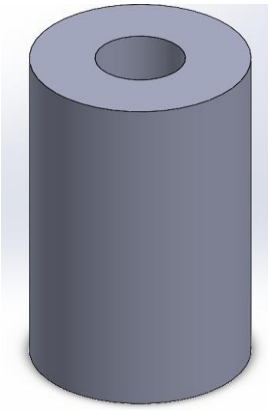


Figura 24. Cilindro guía.

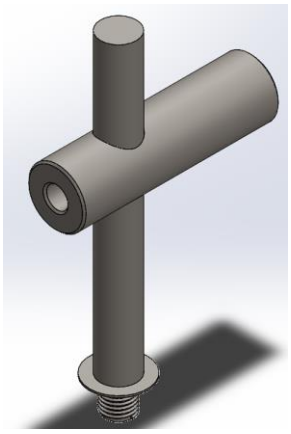


Figura 25. Regulador de altura del canto.



Figura 26. Eje de guía.

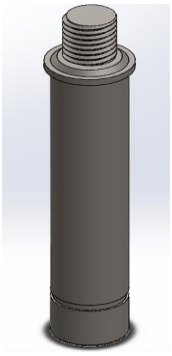


Figura 27. Eje prisionero.

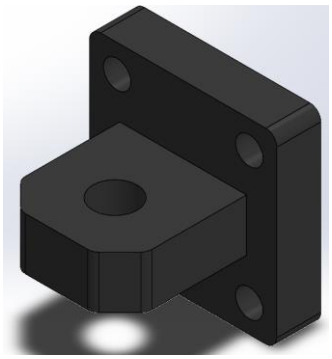


Figura 28. Soporte actuador.

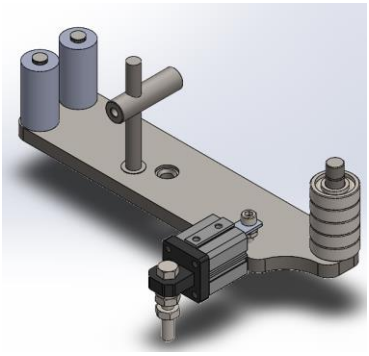


Figura 29. Ensamble entrada canto.

Diseño del sistema de corte del canto

El sistema de corte de extremos emplea una guillotina accionada por un cilindro neumático de doble efecto. El dimensionamiento parte de la fuerza necesaria para cortar el tapacanto al finalizar el recorrido del panel.

El tapacanto de PVC de máximo 2 mm de espesor y 50 mm de ancho es cortado por una cuchilla biselada a 30°:

$$\mathrm{F_{corte}} = \tau_{\mathrm{PVC}} \times \mathrm{A_{corte}} \times \mathrm{K_{cuchilla}} \quad (18)$$

donde:

τ_{PVC} = resistencia al corte del PVC = 35 MPa

$A_{corte} = a_t \times e_t$ = 50 × 2 = 100 mm²

$K_{cuchilla}$ = factor de eficiencia de cuchilla biselada 30° = 0,35

$$F_{corte} = 1225\ N$$

Aplicando el factor de seguridad FS = 3:

$$F_{diseño} = F_{corte} \times FS \quad (19)$$

$$F_{diseño} = 3\,675\ N$$

Nota: el cálculo anterior corresponde al caso más desfavorable absoluto (tapacanto 50 mm × 2 mm). En la práctica el tapacanto estándar más común es 22 mm × 0,5 mm, para el cual:

$$F_{corte} = 35 \times (22 \times 0{,}5) \times 0{,}35$$

$$F_{diseño} = 404\ N$$

Se dimensiona el cilindro para el caso práctico predominante con $F_{diseño} = 404\ N$, ya que el prototipo opera principalmente con tableros de 18 mm y tapacanto 22 mm.

Diámetro del émbolo: Con presión de trabajo $P_{neum} = 6\ bar = 0{,}6\ MPa$ y rendimiento mecánico del cilindro $\eta_{cil} = 0{,}85$:

$$A_{embolo} = \frac{F_{diseño}}{P_{neum} \times \eta_{cil}} \quad (20)$$

$$A_{embolo} = 792\ mm^2$$

El diámetro interior del cilindro:

$$D_{cil} = \sqrt{4 \times \frac{A_{embolo}}{\pi}} \quad (21)$$

$$D_{cil} = 31{,}8\ mm$$

Se selecciona el diámetro comercial normalizado inmediato superior: cilindro de doble efecto Ø 50 mm. La fuerza efectiva de avance:

$$F_{efectiva} = P_{neum} \times \left(\pi \times \frac{D_{cil}^2}{4}\right) \times \eta_{cil} \quad (22)$$

$$F_{efectiva} = 1001.4\ N > 404\ N \checkmark$$

Tabla 26.

Especificaciones del cilindro neumático seleccionado

Parámetro	Valor	Unidad

Tipo	Doble efecto	—
Diámetro del émbolo	50	mm
Carrera	20	mm
Presión de trabajo	4 – 8	bar
Fuerza de empuje (6 bar)	1178,1	N
Fuerza de retracción (6 bar)	989,6	N
Conexión neumática	1/8" BSP	—

Nota. Parámetros verificados conforme al catálogo de Applied Automation Controls (AACI, 2025).

Una vez identificado el actuador a implementar, pasamos con el diseño de los demás componentes que se integran entre si para permitir el correcto funcionamiento de este subsistema.

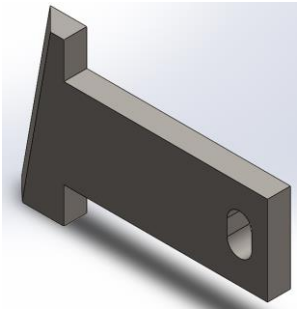


Figura 30. Cuchilla.

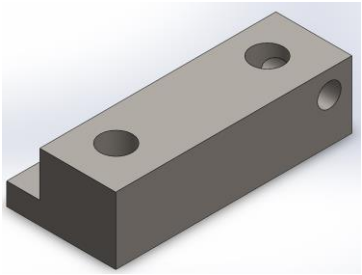


Figura 31. Guia soporte cuchilla.

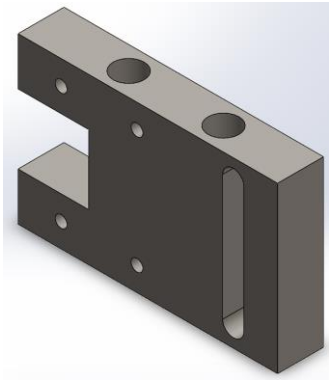


Figura 32. Soporte guía.

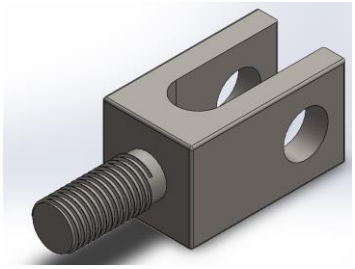


Figura 33. Acople cuchilla actuador.

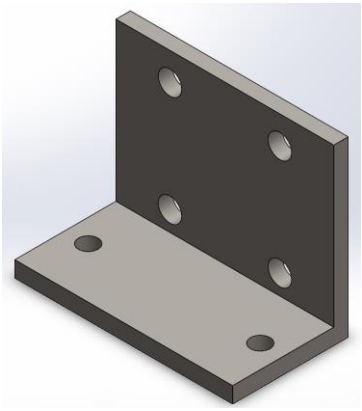


Figura 34. Soporte actuador SDA 50x20.

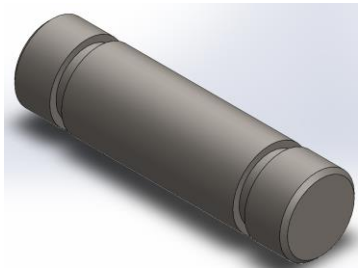


Figura 35. Pasador.

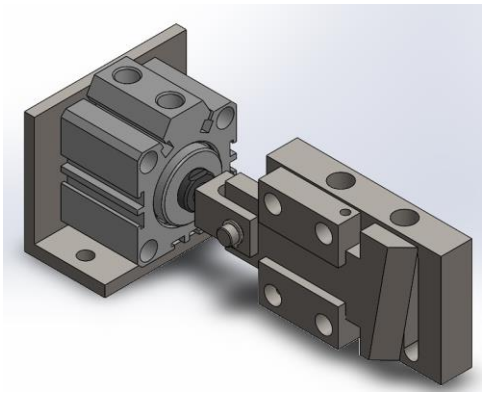


Figura 36. Ensamble end cutting.

Diseño rodillo de presión tapacanto tablero

Este subsistema se encarga de soportar la presión ejercida por el operario que genera sobre el tablero y el tapacanto para lograr la correcta adherencia de los mismo.

Para el diseño del rodillo se considera la fuerza de presión aplicada sobre el tapacanto $F = 20\ N$, el ancho máximo de trabajo que se estableció para el sistema es de $B = 80\ mm$, se selecciona una longitud útil de rodillo ligeramente superior para garantizar contacto completo durante el proceso

$$L = 100\ mm$$

Considerando estabilidad de operación, facilidad de fabricación y compatibilidad con el sistema de transmisión, se adopta un diámetro mínimo comercial para todo el sistema de potencia de:

$$D = 35\ mm$$

El torque aplicado sobre el rodillo debido a la fuerza de presión se calcula mediante la fórmula (5)

$$T = 0.35\ Nm$$

El rodillo se fabrica en acero ASTM A36 y se recomienda un recubrimiento exterior de caucho de aproximadamente 3 mm de espesor para mejorar la adherencia y evitar daños superficiales sobre el tapacanto.

Las dimensiones seleccionadas garantizan una adecuada presión de contacto, estabilidad operacional y compatibilidad con el sistema de arrastre diseñado para la máquina enchapadora.

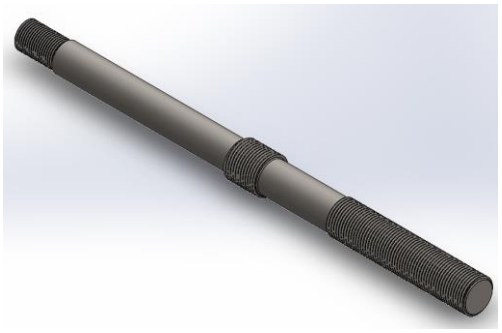


Figura 37. Eje presión tapacanto tablero.

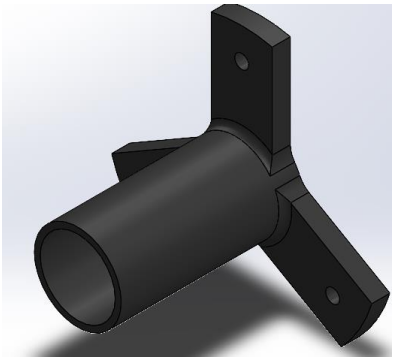


Figura 38. Soporte de ejes.

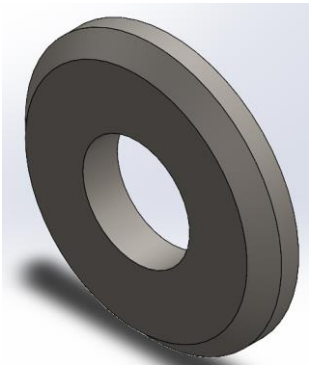


Figura 39. base ajuste presión tapacanto tablero.

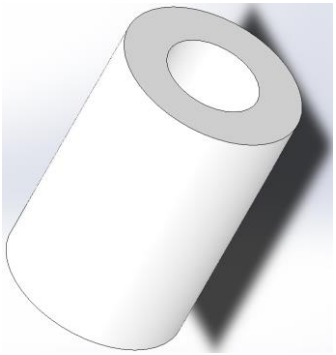


Figura 40. Rodillo presión tapacanto tablero.

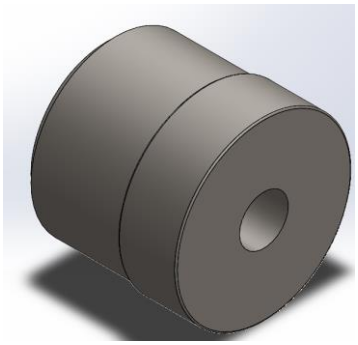


Figura 41. Rodillo superior presión tapacanto tablero.

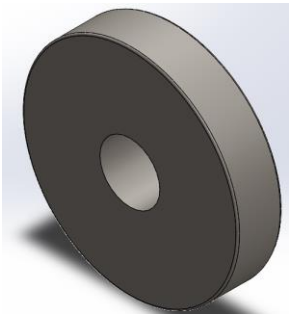


Figura 42. Contratuerca rodillo superior superior presión tapacanto tablero.

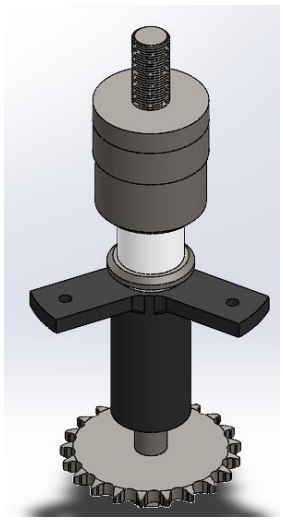


Figura 43. Ensamble rodillo presión tapacanto tablero

Diseño de rodillo de presión pre y post trimming

Estos rodillos son los encargados de servir como guía del tablero enchapado antes de ingresar al subsistema de trimming y manteniendo la presión constante para el tablero enchapado, asegurando así la correcta adherencia por todo el proceso.

Como se menciona en el apartado anterior se toma un diámetro mínimo para todo el sistema que en este caso es de $D = 35\ mm$

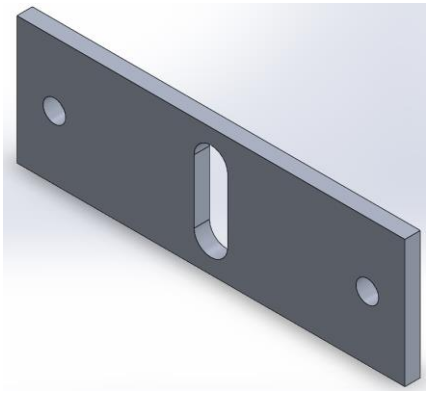


Figura 44. Base rodillo presión.

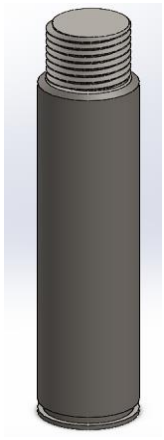


Figura 45. eje rodillo presión.

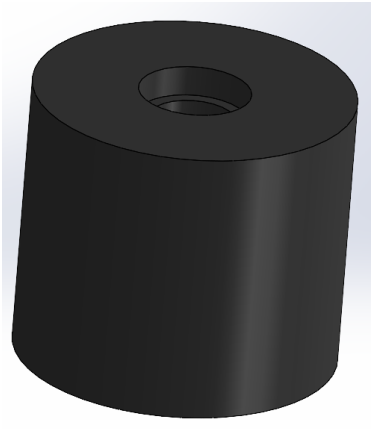


Figura 46. rodillo presión

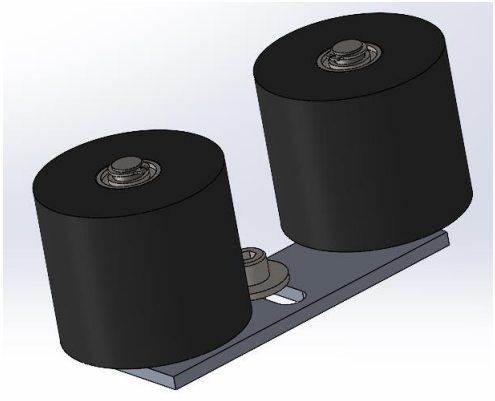


Figura 47. Ensamble rodillo presión.

Diseño del subsistema trimming

Este subsistema siendo el encargado de quita el exceso de canto para que el tablero salga con las medidas requeridas por lo que es importante lograr un corte preciso para maximizar la calidad de los tableros. El elemento que debemos cálculos son los resortes, estos deben permitir que la fresadora mantenga contacto constante con el tablero para la correcta remoción del exceso del tapacanto, además de tener en cuenta las fuerzas de corte que genera el fresado del canto.

Diseño del resorte.

Las fuerzas verticales que actúan sobre el cabezal móvil son el peso del conjunto, la componente radial de la fuerza de corte que lo empuja hacia arriba, y la fuerza de los resortes que lo empuja hacia abajo.

El peso del conjunto cabezal superior (router + soporte + rodamiento seguidor):

$$W_{cabezal} = m_{cabezal} \times g \quad (23)$$

$$W_{cabezal} = 2{,}2 \times 9{,}81$$

$$W_{cabezal} = 21{,}6\ N$$

La fuerza de corte tangencial de la fresa recta sobre el tapacanto excedente:

$$F_{tangencial} = k_c \times a_p \times f_z \times z \quad (24)$$

donde:

k_c = presión específica de corte para PVC = 800 N/mm²

a_p = profundidad de corte axial = excedente máximo = 2,5 mm

f_z = avance por diente = 0,10 mm

z = número de filos = 4

$$\mathrm{F_{tangencial}} = 800\ \mathrm{N}$$

La componente radial que empuja el cabezal hacia arriba, estimada en el 25 % de la fuerza tangencial para fresas de carburo de ángulo de hélice 0°:

$$\mathrm{F_{radial}} = 0{,}25 \times \mathrm{F_{tangencial}} \quad (25)$$

$$\mathrm{F_{radial}} = 200\ \mathrm{N}$$

Estableciendo una fuerza de contacto mínima de diseño $F_{contacto} = 60\ N$ para garantizar seguimiento estable, la fuerza mínima requerida por el conjunto de resortes:

$$\mathrm{F_{resortes}} \geq \mathrm{F_{radial}} + \mathrm{F_{contacto}} - \mathrm{W_{cabezal}} \quad (26)$$

$$\mathrm{F_{resortes}} = 238{,}4\ \mathrm{N}$$

Se utilizan dos resortes idénticos, uno por cada barra de guiado, con una fuerza de diseño por resorte:

$$\mathrm{F_{diseño_resorte}} = 119{,}2\ \mathrm{N} \quad (27)$$

Selección del resorte de compresión. A partir de la fuerza de diseño y el recorrido operativo requerido, se selecciona un resorte helicoidal de compresión con las especificaciones de la **Tabla *27***.

Tabla 27.

Especificaciones del resorte de seguimiento del cabezal superior

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**
Material	—	ASTM A228	—
Longitud libre	L_0	75,5	mm
Diámetro exterior	D_e	22	mm
Diámetro del alambre	d_w	2,5	mm

Diámetro medio	$D_m = D_e - d_w$	19,5	mm
Índice de resorte	$C = \frac{D_m}{d_w}$	7,8	—
Espiras activas	N_a	10	—
Espiras totales	N_t	12	—

Nota. Resorte seleccionado con base en los requerimientos de fuerza y recorrido calculados. Fuente propia.

Cálculo de la constante del resorte. Con G = 79 000 N/mm² para acero ASTM A228 (Shingley, 2012):

$$k = \frac{G \times d_w^4}{8 \times D_m^3 \times N_a} \quad (28)$$

$$k = 5{,}20\ \mathrm{N/mm}$$

La longitud sólida del resorte:

$$L_s = N_t \times d_w \quad (29)$$

$$L_s = 30\ \mathrm{mm}$$

La compresión máxima disponible:

$$\delta_{max} = L_0 - L_s \quad (30)$$

$$\delta_{max} = 45{,}5\ \mathrm{mm}$$

El resorte absorbe únicamente variaciones superficiales locales de ±5 mm durante el corte. La compresión de montaje necesaria para generar la fuerza de diseño en cada resorte:

$$\delta_{montaje} = \frac{F_{diseño_resorte}}{k} \quad (31)$$

$$\delta_{montaje} = 22.9\ \mathrm{mm}$$

La longitud del resorte en posición de trabajo:

$$L_{trabajo} = L_0 - \delta_{montaje} \quad (32)$$

$$L_{trabajo} = 52.6\ \mathrm{mm} > L_s = 30\ \mathrm{mm}$$

La fuerza máxima sobre cada resorte cuando el panel empuja el cabezal 5 mm adicionales:

$$F_{max} = k \times (\delta_{montaje} + \delta_{trabajo}) \quad (33)$$

$$F_{max} = 145.1\ \mathrm{N}$$

Verificación de esfuerzos. El factor de corrección de Wahl para C = 7,8:

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0{,}615}{C} \quad (34)$$

$$K_w = 1{,}189$$

El esfuerzo máximo de corte en el alambre bajo F_{max}:

$$\tau_{max} = K_w \times \frac{8 \times F_{max} \times D_m}{\pi \times d_w^3} \quad (35)$$

$$\tau_{max} = 548.3\ \mathrm{MPa}$$

La resistencia al corte del material para $d_w = 2{,}5\ mm$ según (Shingley, 2012) es $S_{ut} \approx 1936\ MPa$:

$$S_{sy} = 0{,}45 \times S_{ut} \quad (36)$$

$$S_{sy} = 871.2\ \mathrm{MPa}$$

El factor de seguridad:

$$FS_{resorte} = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} \quad (37)$$

$$FS_{resorte} = 1{,}59 \geq 1{,}5\ \checkmark$$

El resorte seleccionado cumple con todos los requisitos de fuerza, recorrido y resistencia mecánica.



Figura 48. Resorte.

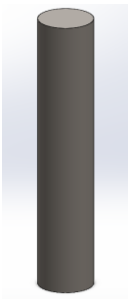


Figura 49. Barra guía.

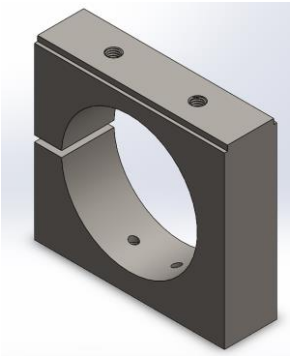


Figura 50. Soporte fresadora.

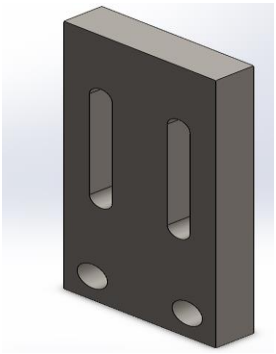


Figura 51. Barra soporte del seguidor.

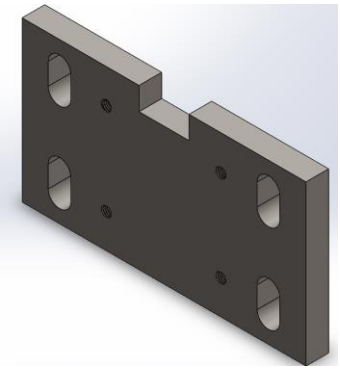


Figura 52. Base trimming.

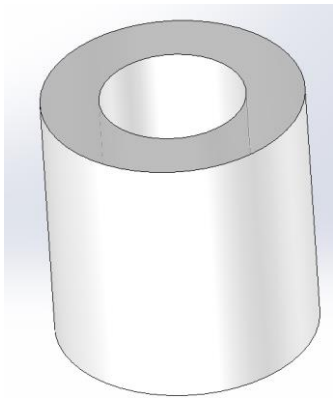


Figura 53. Rodillos sistema trimming.

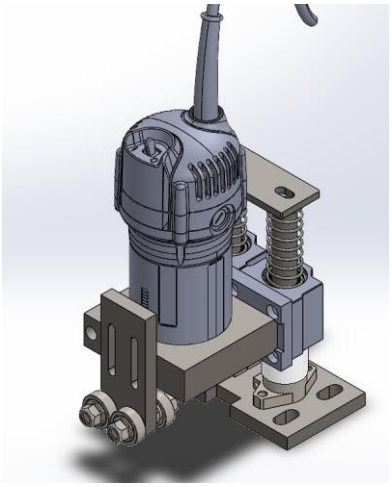


Figura 54. Ensamble sistema trimming.

Diseño de estructura y mesa

Analizaremos la estructura de la mesa y la estructura de soporte para toda la máquina, considerando refuerzos con perfiles en U para mantener la rigidez de la estructura, evitando que esta se pandee.

Propiedades geométricas del perfil U 40×20×5

De acuerdo con Beer (2013), el área total de la sección se obtiene sumando las áreas de sus componentes rectangulares:

$$A_U = 2(b \cdot t) + (h - 2t) \cdot t \quad (38)$$

Donde:

- h = altura total del perfil = 40 mm

- b = ancho del ala = 20 mm
- t = espesor uniforme = 5 mm

$$A_U = 350\ mm^2$$

Por simetría de la sección respecto al eje horizontal:

$$\bar{y} = \frac{h}{2} \quad (39)$$

$$\bar{y} = 20mm$$

El momento de inercia respecto al eje centroidal horizontal, mediante el teorema de Steiner (Beer et al., 2013):

$$I_x = 2 \cdot \left[\frac{b \cdot t^3}{12} + (b \cdot t) \cdot \left(\frac{h - t}{2} - \bar{y}\right)^2\right] + \frac{[t \cdot (h - 2t)^3]}{12} \quad (40)$$

$$I_x = 7882{,}66\ mm^4$$

Módulo resistente:

$$S_x = \frac{I_x}{\bar{y}} \quad (41)$$

$$S_x = 394.13\ mm^3$$

Peso propio por unidad de longitud:

$$w_u = A_u \cdot \rho \cdot g \quad (42)$$

$$w_u = 0{,}027\ N/mm$$

Cargas de diseño

Aquí calcularemos la fuerza que ejercen los componentes, la mesa de soporte, mediante el ensamblaje CAD verificamos que la masa es $m_{mesa-componentes} = 90\ Kg$ y el panel de melamina máximo sobre la mesa con medidas ($1\,200 \times 700 \times 18\ mm\ \rho_{MDF} = 700\ kg/m^3$):

$$W_{panel} = 104\ N$$

$$W_{total} = m_{mesa-componentes} \times g + W_{panel}$$

$$W_{total} = 986{,}9\ N$$

Presión uniformemente distribuida sobre la mesa:

$$q = \frac{W_{\text{total}}}{L_{\text{mesa}} \times B_{\text{mesa}}} \quad (43)$$

$$q = 1{,}070 \times 10^{-3}\ N/mm^2$$

Plancha de la mesa (flexión entre rigidizadores)

La plancha de la mesa se modela como una placa simplemente apoyada bajo carga uniforme. Dado que la relación entre la longitud **b** y el vano **a** satisface $\frac{\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{a}} = \mathbf{3{,}38} > \mathbf{2}$, el análisis unidireccional es válido conforme a Timoshenko y Woinowsky-Krieger (1959):

$$M_{\max} = \frac{q \cdot a^2}{8} \quad (44)$$

$$M_{\max} = 18{,}31\ N \cdot \frac{mm}{mm}$$

Esfuerzo máximo de flexión:

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot M_{max}}{t^2} \quad (45)$$

$$\sigma_{\max} = 4{,}39\ MPa$$
$$\sigma_{\max} = 4{,}39\ MPa < \sigma_{adm} = 150\ MPa \quad \checkmark$$

Deflexión máxima (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959):

$$\delta_{\max} = \frac{5 \cdot q \cdot a^4}{\left[384 \cdot E \cdot \left(\frac{t^3}{12}\right)\right]} \quad (46)$$

$$\delta_{\max} = 0{,}125\ mm < \delta_{adm} = 1{,}23\ mm \checkmark$$

Perfil U como viga rigidizadora

El perfil U central (vano $L = 1\,250\ mm$) soporta su área tributaria de $s = 370\ mm$:

$$w_{total} = q \cdot s + w_U \quad (47)$$

$$w_{total} = 0{,}423\ N/mm$$

Momento flector máximo (Beer et al., 2013):

$$M_{\max} = \frac{w_{total} \cdot L^2}{8} \quad (48)$$

$$M_{\max} = 82.617\ N \cdot mm$$

Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{S_x} \quad (49)$$

$$\sigma_{\max} = 22{,}66\ MPa < \sigma_{adm} = 150\ MPa \quad \checkmark$$

Deflexión máxima:

$$\delta_{\max} = \frac{5 \times w_{total} \times L^4}{384 \times E \times I_x} \quad (50)$$

$$\delta_{\max} = 0{,}922\ mm < \delta_{adm} = 4{,}17\ mm \quad \checkmark$$

Paredes de la base: compresión y pandeo

Las paredes de la base soportan la carga total de la mesa y componentes distribuida sobre el perímetro:

$$\sigma_{comp} = \frac{W_{total}}{P_{base} \times t} \quad (51)$$

$$\sigma_{comp} = 0{,}12\ MPa$$

Esfuerzo crítico de pandeo local:

Conforme a Timoshenko y Gere (1961), el esfuerzo crítico de pandeo de una placa rectangular delgada bajo compresión uniforme, con cuatro bordes simplemente apoyados, es:

$$\sigma_{cr} = \frac{[\, k \times \pi^2 \times E \,]}{[\, 12(1 - \nu^2) \,]} \times \left(\frac{t}{h_{base}}\right)^2 \quad (52)$$

donde $k = 4{,}0$ para relación $\frac{b}{h} > 1$ (Timoshenko & Gere, 1961):

$$\sigma_{cr} = 11.6\ MPa$$

$$FS_{pandeo} = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{comp}} = 96.6 \quad \checkmark$$

Todos los elementos estructurales de la máquina cumplen con los criterios de resistencia y rigidez establecidos por AISC 360-22. El elemento más solicitado es el perfil U rigidizador con un factor de seguridad de FS = 6,6, y el menos solicitado es la pared de la base

con FS = 96.6 frente al pandeo local. Los altos factores de seguridad obtenidos son consistentes con el criterio de diseño de planchas de 2 mm de espesor, cuya selección responde a requerimientos constructivos (soldabilidad, rigidez de ensamblaje y resistencia al impacto) más que a límites de esfuerzo. La estructura queda validada para las condiciones de operación descritas.

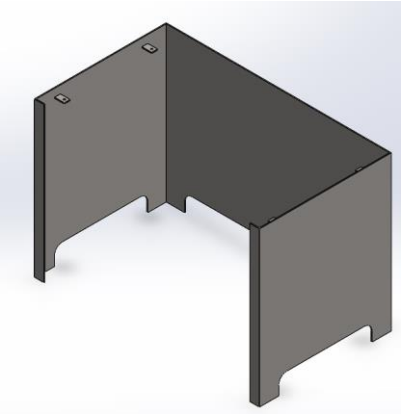


Figura 55. Estructura soporte.

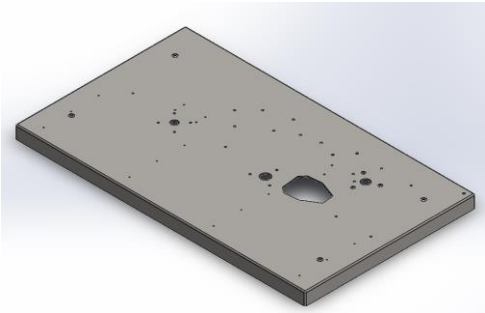


Figura 56. Mesa soporte.

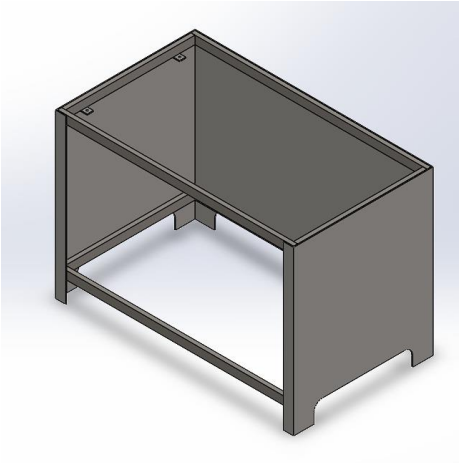


Figura 57. Ensamble estructura.

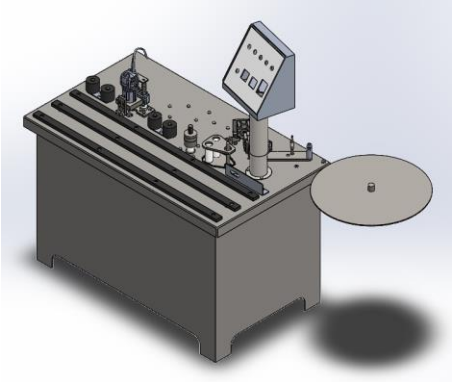


Figura 58. Ensamble maquina enchapadora.

Análisis CAE de la estructura de la máquina

Tensión de Von Mises máxima 17.03 MPa

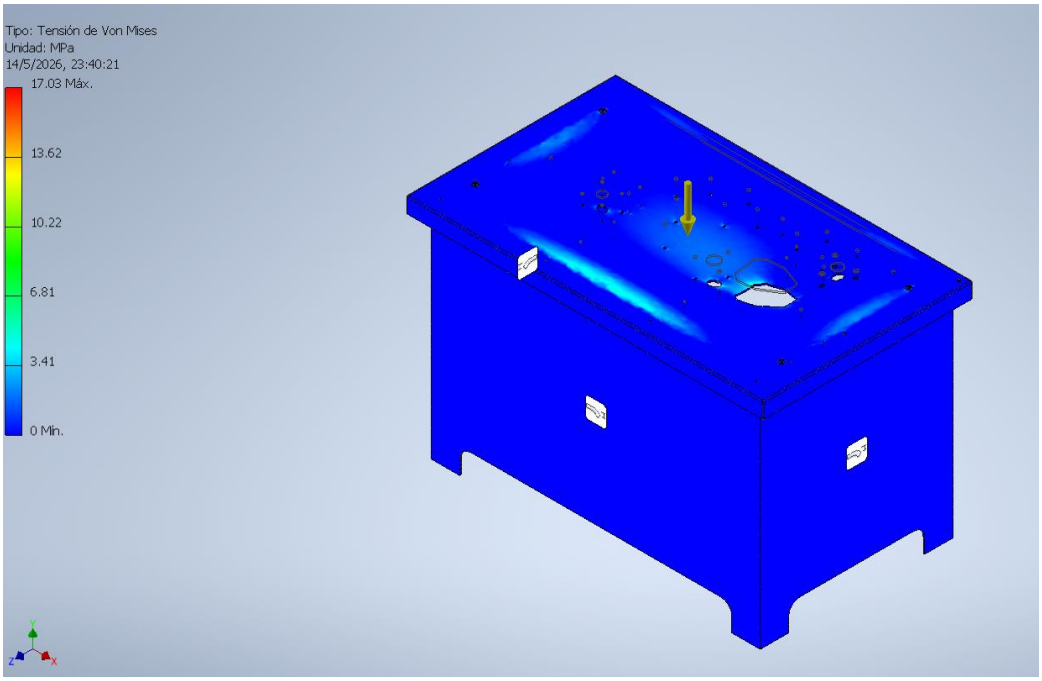


Figura 59. Resultado simulación, Tensión de Von Mises

Desplazamiento máximo de 0.2484 mm

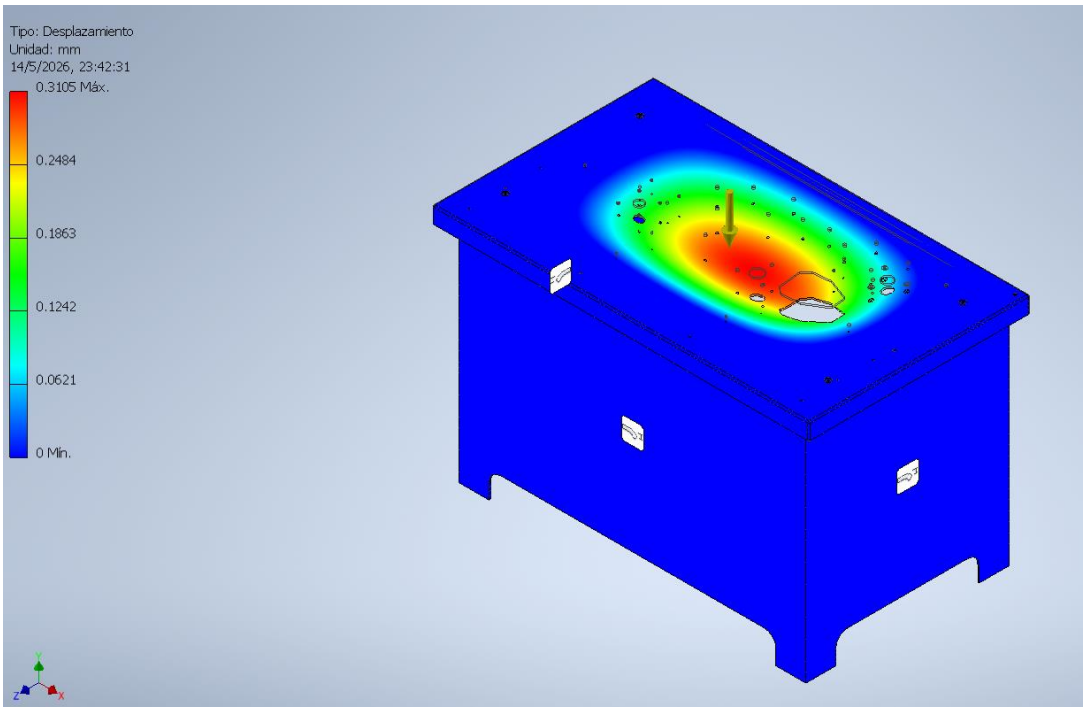


Figura 60. Resultado simulación, Desplazamiento.

Diseño del sistema electrónico

Para la implementación del sistema electrónico, al ser un sistema no muy complejo, optaremos por implementar un control por lógica cableada.

Dimensionamiento de protecciones

Para el dimensionamiento de las protecciones eléctricas de la máquina se establece primero el balance de potencia y las corrientes nominales de cada carga, dado que estos valores determinan tanto el calibre del disyuntor principal como la capacidad de los conductores y los dispositivos de protección de rama. La alimentación de la máquina es monofásica a 220 V CA, 60 Hz.

Corrientes nominales por carga

Para las cargas de tipo motor (motorreductor y fresadoras) la corriente nominal se determina a partir de la potencia de eje, el factor de potencia y la eficiencia del motor, según la siguiente expresión (Chapman, 2012):

$$I_{motor} = \frac{P}{V \times FP \times \eta} \quad (53)$$

Donde:

- $P =$ Potencia nominal del motor $[W]$
- $V =$ Tensión de alimentación $= 220\ V$
- $FP =$ Fator de potencia $0{,}85$ (motores monofásicos < 1 kW, valor típico según Chapman, 2012)
- $\eta =$ rendimiento del motor $= 0{,}85$ (motores monofásicos < 1 kW)

$$I_{mred} = 1{,}57\ A$$

$$I_{tupis} = 3{,}34\ A$$

Para las resistencias calefactoras, al tratarse de cargas puramente resistivas ($FP = 1{,}0;\ \eta = 1{,}0$):

$$I_R = \frac{P}{V} \quad (54)$$

$$I_R = 2{,}73\ A$$

La corriente de la electroválvula se estima a partir de la potencia reactiva de la bobina solenoide (≈ 15 VA):

$$I_{EV} = 0{,}07\ A\ \ (Despreciable)$$

La corriente total demandada por la máquina es:

$$I_{total} = I_{mred} + I_{tupis} \times 2 + 4 \times I_R + I_{EV} \quad (55)$$

$$I_{Total} = 22{,}87\ A$$

La potencia activa total instalada:

$$P_{Total} = 3\ 765\ W\ \approx 3{,}8\ kW$$

En la Tabla *28* se presenta el resumen de corrientes nominales por subsistema.

Tabla 28.

Corrientes nominales de los componentes de la máquina enchapadora

Componente	Cantidad	$P_{unitaria}\ (W)$	FP	η	$I_{nominal}\ (A)$	$I_{subtotal}\ (A)$
Motorreductor + controlador	1	250	0,85	0,85	1,57	1,57
Fresadora (tupí)	2	550	0,85	0,85	3,34	6,68
Resistencia calefactora	4	600	1,00	1,00	2,73	10,91
Electroválvula	1	15	—	—	0,07	0,07
Total		**3 765**				**19,23**

Dimensionamiento del disyuntor

Conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 (2011) y a IEC 60364-4-43, la corriente nominal del disyuntor principal debe satisfacer:

$$I_{disy} \geq 1{,}25 \times I_{total} \quad (56)$$

$$I_{disy} = 24{,}04\ A$$

El valor 1,25 corresponde al factor de corriente continua exigido para protecciones que operan al 100 % de su capacidad nominal (NEC-11, Art. 210-20). Aplicando este criterio, se selecciona el calibre comercial normalizado inmediato superior:

$$I_{disy} = 25\ A\ (seleccionado)$$

Se adopta un disyuntor tripolar (3P) de 25 A, curva C, conforme a IEC 60898-1, apropiado para cargas mixtas (resistivas e inductivas) en una instalación monofásica 220 V. La curva C garantiza la no actuación ante las corrientes de arranque de las fresadoras ($I_{arranque} \approx 6 \cdot I_n = 20\ A$), ya que el umbral de disparo magnético instantáneo es $5 \times 50 =$

250 A, valor muy superior a cualquier transitorio de arranque del sistema. Ademas de permitir usar que el disyuntor actúe como interruptor para tres salidas diferentes. Si hay un problema en cualquier cable de salida, las tres palancas bajarán juntas.

Dimensionamiento del fusible

Para la protección del circuito de control (REX C100, bobinas de contactores, electroválvula y señales de sensores) se emplea un fusible de cartucho de 2 A tipo gG (IEC 60269-2), el cual protege el cableado de señal y los componentes electrónicos ante sobreintensidades. La corriente máxima del circuito de control se estima en 0,5 A, por lo que el fusible de 2 A ofrece un factor de seguridad de 4 respecto a la corriente nominal y actúa rápidamente ante un cortocircuito.

Dimensionamiento de conductores

El criterio de selección exige que la capacidad de conducción de cada conductor satisfaga (IEC 60364-5-52, método B, cobre, PVC 70 °C, 30 °C ambiente):

$$I_{conductor} \geq 1{,}25 \times I_n \quad (57)$$

Tabla 29.

Diámetro de los conductores calculados

Línea	Carga	$I_n\ (A)$	$I_{mín_cond}\ (A)$	Protección de rama	Conductor
Acometida (L+N)	Toda la máquina	19,23	24,04	Disyuntor C25 3P	6 mm² Cu
L1	Calderín (4 resistencias.)	10,91	13,64	KM1	6 mm² Cu
L2	Fresadoras (2 tupís)	6,68	8,35	KM2	6 mm² Cu
L3	Motorreductor + controlador	1,57	1,96	KM3	2.5 mm² Cu
N	Neutro común	19,23	24,04	—	6 mm² Cu

Control	PID, bobinas, EV	< 0,5	< 0,5	Fusible 2 A gG	1,5 mm² Cu

Selección de contactores

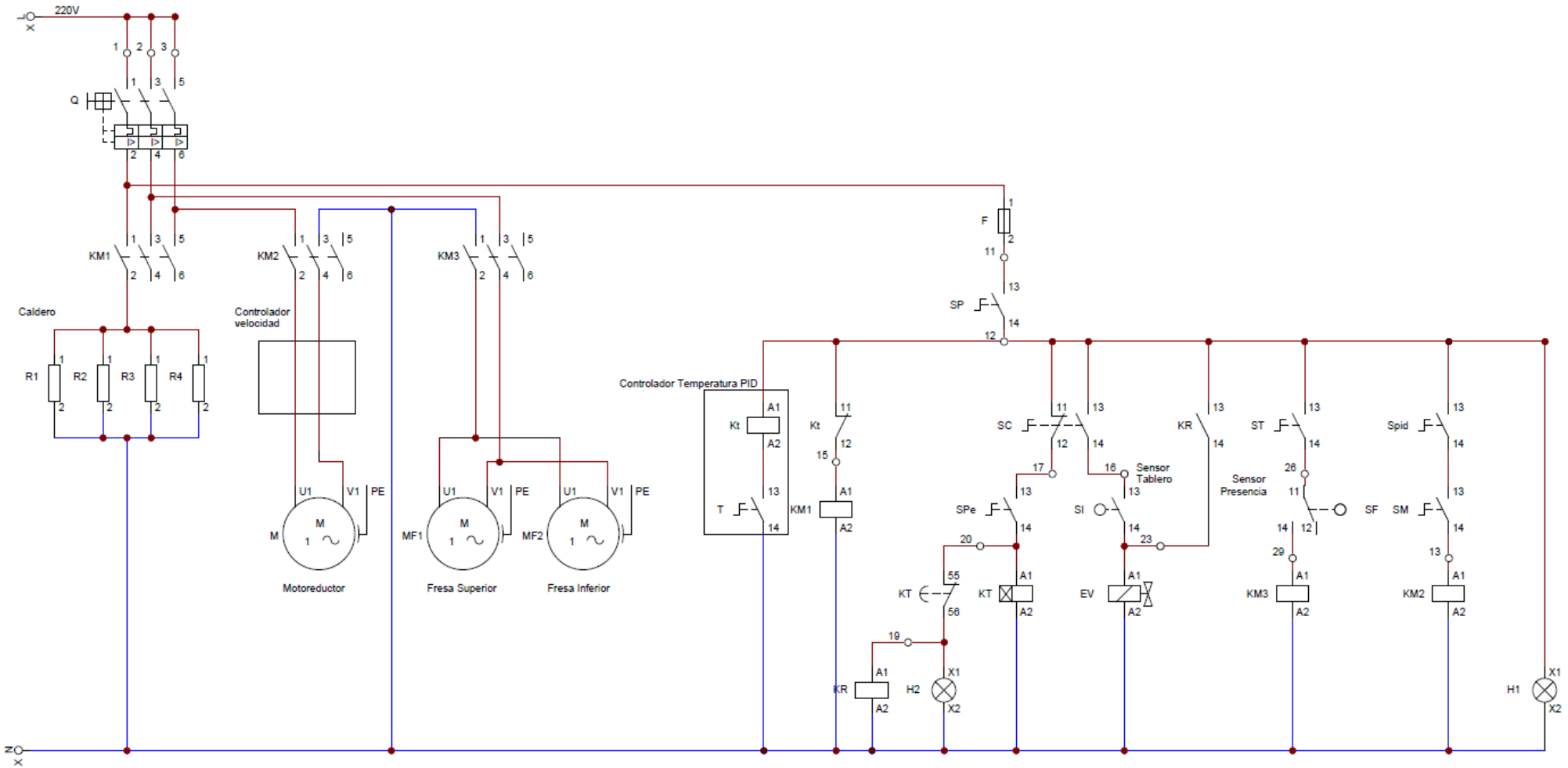
Para los contactores optaremos por seleccionar en base a la máxima corriente que viene a ser la de las resistencias, la tabla mostraría el resultado de esta selección.

Tabla 30.

Selección de contactores

Ref.	**Carga**	**Categoría IEC**	$I_{carga}\ (A)$	$I_e(A)$	**Bobina**
KM1	Calderín	AC-1	10,91	12 A	220 VAC
KM2	Motorreductor + controlador	AC-3	1,57	12 A	220 VAC
KM3	Fresadoras	AC-3	3,34	12 A	220 VAC

Esquema eléctrico



Diseño del controlador PID temperatura

El calderín de la máquina enchapadora constituye un proceso térmico de primer orden cuya variable controlada es la temperatura del adhesivo hot melt. La función del sistema de control es mantener esta temperatura en el valor de consigna establecido (170–180°C), garantizando la viscosidad adecuada del adhesivo para una correcta adhesión del tapacanto. Para el diseño del controlador PID, se adoptó un enfoque experimental basado en la identificación de la función de transferencia del proceso a partir de datos reales de operación.

Experimento de identificación — Respuesta al escalón.

Con el fin de obtener el modelo matemático del proceso, se realizó una prueba de respuesta al escalón en lazo abierto. El calderín se encontraba inicialmente a temperatura ambiente (T_0 = 39°C), condición que representa el estado frío de la máquina. Se aplicó un escalón del 100% de potencia a las resistencias calefactoras tipo cartucho (220 V), y se registró la evolución de la temperatura mediante la termocupla instalada en el calderín. Los datos fueron adquiridos durante un período de 13.45 minutos, obteniendo 50 puntos de medición con una frecuencia de muestreo de 0.15 minutos, en la Tabla *31* se mostrará un resumen con los puntos más importantes.

Tabla 31.

Parámetros del modelo FOPDT identificados para el calderín

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Ganancia estática	K	1.61	°C/%
Tiempo muerto	L	2.11	min
Constante de tiempo	τ	17.89	min
Relación $\frac{L}{\tau}$	—	0.118	—
Temperatura inicial	T_i	39	°C
Temperatura de estado estable (estimada)	$T\infty$	200	°C

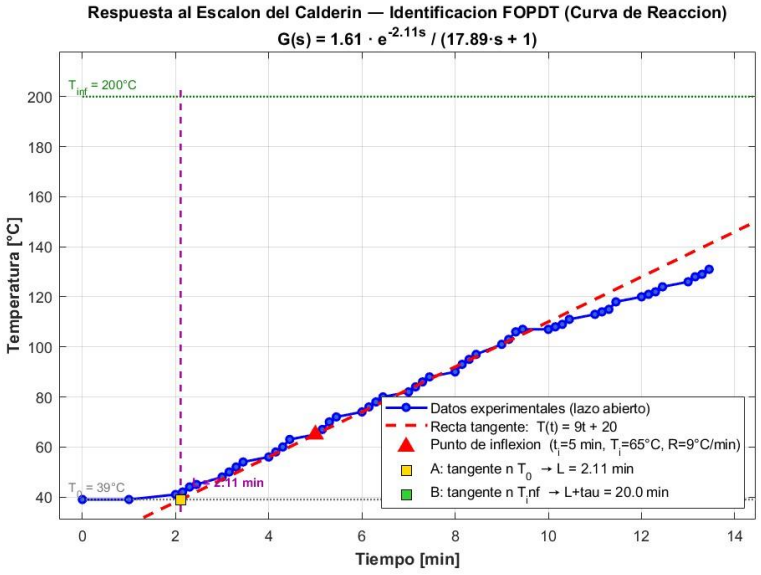


Figura 61. Respuesta al escalo del caldero y la recta tangente descrita.

Durante el registro de datos se observó un comportamiento particular alrededor de los 107°C: la temperatura se mantuvo constante durante aproximadamente 0.55 minutos antes de

reanudar su ascenso como se muestra en la Figura 61. Este fenómeno corresponde a la absorción del calor latente de fusión del adhesivo hot melt durante su cambio de fase (sólido a líquido), cuya temperatura de transición es característica del adhesivo PUR utilizado. Una vez completada la fusión, el proceso retomó el comportamiento dinámico propio de un sistema térmico de primer orden.

Modelo matemático del proceso — FOPDT

El proceso de calentamiento del calderín se modeló mediante una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto (FOPDT, por sus siglas en inglés: First Order Plus Dead Time), dado que este modelo captura adecuadamente la dinámica de procesos térmicos con inercia térmica y retardo de transporte (Coughanowr & LeBlanc, 2009). La forma general del modelo es:

$$G(s) = K \cdot \frac{e^{-L \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (48)$$

donde:

- $G(s)$ = función de transferencia del proceso
- K = ganancia estática del proceso [°C/%]
- L = tiempo muerto o retardo [min]
- τ = constante de tiempo del proceso [min]
- s = variable compleja de Laplace [1/min]

Para la estimación de los parámetros del modelo FOPDT se aplicó el método de la curva de reacción, propuesto por Smith (1957), que utiliza la pendiente

máxima de la respuesta al escalón y la intersección de la recta tangente en el punto de inflexión con el valor inicial de la variable de proceso. Del análisis de los datos experimentales se determinó que la pendiente máxima de la curva de respuesta se presenta en torno a t = 5 minutos, con un valor de:

$$R = \frac{\Delta T}{\Delta t|_{máx}} = 9\,°C/min$$

La recta tangente trazada en el punto de inflexión ($t_i = 5\,min, T_i = 65°C$) adopta la forma:

$$T(t) = R \cdot t + (T_i - R \cdot t_i) = 9t + 20$$

El tiempo muerto se obtiene calculando el instante en que la recta tangente intersecta el valor inicial $T_i = 39°C$:

$$39 = 9 \cdot L + 20 \rightarrow L = \frac{19}{9} \approx 2.11\,min$$

Para la estimación de la constante de tiempo τ se consideró que, al aplicar el 100% de la potencia instalada de las resistencias calefactoras, el sistema alcanza una temperatura de estado estable estimada en $T\infty \approx 200°C$, valor coherente con las pérdidas térmicas del calderín en operación a plena carga. El tiempo en que la recta tangente alcanza $T\infty$ corresponde a $L + \tau$:

$$(L + \tau) = \frac{T\infty - 20}{R} = 20.0\,min$$

por tanto:

$$\tau = 20.0 - L = 17.89\,min$$

La ganancia estática del proceso se define como la relación entre el cambio total de temperatura y el cambio de la variable manipulada:

$$K = \frac{\Delta Y\infty}{\Delta u} = \frac{T\infty - T^0}{\Delta u} = 1.61\,°C/\%$$

La relación $\frac{L}{\tau} = 0.118$ indica que el proceso posee un tiempo muerto pequeño en comparación con su constante de tiempo, condición que favorece significativamente el desempeño del controlador PID (Seborg et al., 2016).

La función de transferencia del calderín queda definida como:

$$G(s) = 1.61 \cdot \frac{e^{-2.11 \cdot s}}{17.89 \cdot s + 1}$$

donde las unidades de tiempo están expresadas en minutos.

Para la sintonía del controlador PID se seleccionó el método de Cohen y Coon (1953), que ofrece un mejor desempeño que el método de Ziegler-Nichols para procesos con relación $\frac{L}{\tau} < 0.5$, al proporcionar una respuesta más balanceada entre velocidad de respuesta y robustez frente a perturbaciones (Shinskey, 1996). Las expresiones de sintonía para el controlador PID en su forma paralela o ISA son:

$$Kp = \left(\frac{1}{K}\right) \times \left(\frac{\tau}{L}\right) \times \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right) \quad (49)$$

$$Kp = 7{,}18 \ \frac{\%}{°C}$$

$$Ti = L \cdot \frac{32 + 6 \cdot \frac{L}{\tau}}{13 + 8 \cdot \frac{L}{\tau}} \quad (50)$$

$$Ti = 4.95 \ min$$

$$Td = 4 \cdot \frac{L}{11 + 2 \cdot \frac{L}{\tau}} \quad (51)$$

$$Td = 0.751 \ min$$

Los parámetros del controlador calculados se presentan en la Tabla *32*.

Tabla 32.

Parámetros del controlador PID — Método Cohen-Coon

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Ganancia proporcional	Kp	7.18	%/°C
Banda proporcional	BP	13.93	%
Tiempo integral	Ti	4.95	min
Tiempo derivativo	Td	0.751	min
Ganancia integral	Ki	1.451	%/(°C·min)
Ganancia derivativa	Kd	5.392	%·min/°C

Con las constantes encontradas validaremos el comportamiento del controlador diseñado simulándolo en Matlab, a continuación, se presenta el resultado en la siguiente Figura 62.

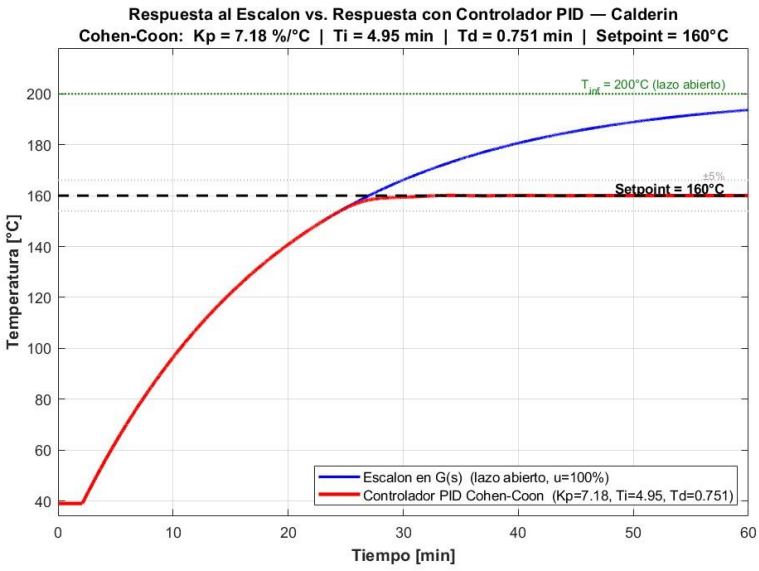


Figura 62. Respuesta del controlador PID

HMI

Para el diseño de HMI donde monitorearemos el accionamiento de los diferentes sistemas, como le monitoreo de estados mas que de valores como temperatura, por motivo de que los controladores implementados tienen tecnología propietaria, donde no podemos acceder a los valores de temperatura y velocidad, si requerimos estos valores deberemos implementar sensores y convertidores de señales para obtener estos valores, aumentando aun mas el costo de implementación.

El programa que usaremos Logo Web Editor (LWE) de simens para poder visualizar el proceso mediante una dirección IP que nos redirecciona al HMI cargada en un PLC Logo. En la siguiente Figura 63 se presenta el HMI final.

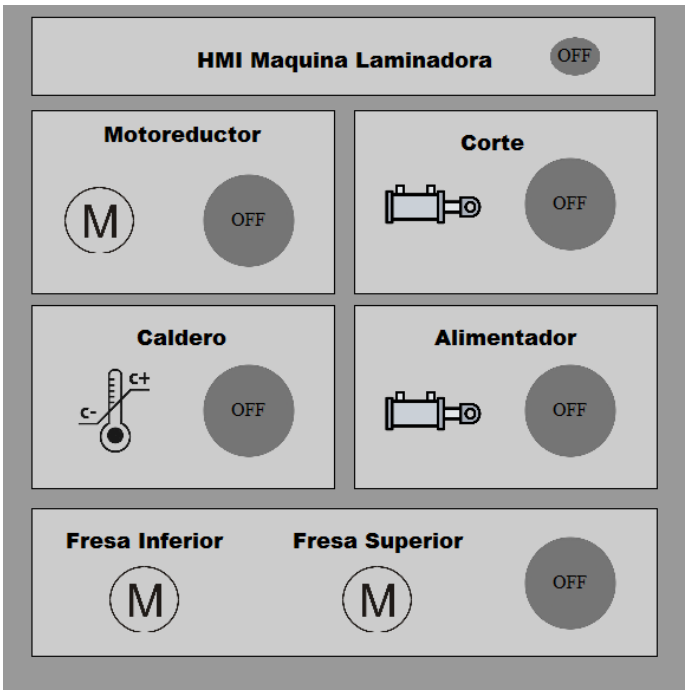


Figura 63. HMI para a máquina enchapadora de cantos.

Implementación del prototipo

Una vez concluidas las fases de diseño conceptual y dimensionamiento analítico bajo la metodología VDI 2206, se procedió con la construcción física, ensamblaje e integración de los

sistemas mecatrónicos que conforman la máquina enchapadora de cantos semiautomática para la empresa Novocentro Cayambe. Esta etapa de implementación materializa las soluciones de ingeniería mecánica, eléctrica y de control orientadas a optimizar el proceso de canteado de paneles de melamina.

Implementación del sistema mecánico y estructural

Construcción de la estructura y mesa de soporte

La fabricación de la bancada estructural como se muestra en Figura 64 a) se realizó utilizando perfiles de acero ASTM A36, seleccionados por su alta soldabilidad y rigidez mecánica. El proceso de unión se ejecutó mediante soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), asegurando cordones homogéneos para mitigar las vibraciones inducidas por los motores de alta velocidad. Posteriormente, la estructura fue sometida a un tratamiento de limpieza superficial y recubrimiento anticorrosivo industrial. La mesa de soporte superior fue mecanizada y rectificada como se muestra en la Figura 64 b) para garantizar una superficie perfectamente plana que sirva de referencia constante durante el desplazamiento de los tableros melamínicos.



a)

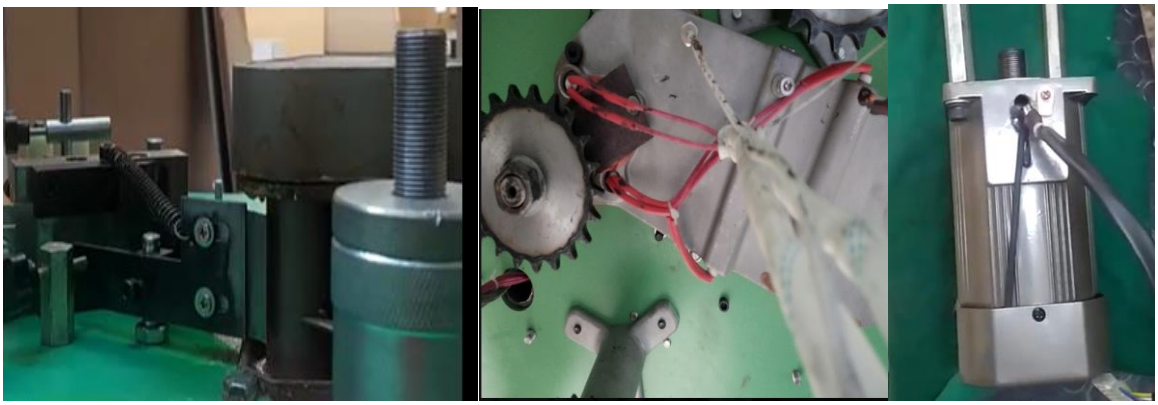


b)

Figura 64.a) Vista general de la estructura soporte; b) Mesa de trabajo.

Integración del Módulo de Encolado y Sistema de Arrastre

El subsistema de encolado (Gluing) se implementó adaptando el módulo de caldera facilitado para el proyecto. Este conjunto fue alineado y acoplado rígidamente al inicio de la mesa de trabajo. El sistema de transmisión de potencia se estructuró mediante un motorreductor comercial de 40 W acoplado a un arreglo de poleas y bandas síncronas, complementado con un sistema de cadena y catalinas de 21 dientes para el rodillo motriz como se muestra en la Figura 65 a). Para asegurar la correcta alimentación del tapacanto de PVC, se instaló el actuador neumático lineal compacto SDA 20×15 como se muestra en la Figura 65 b), cuyo vástago ejerce la fuerza normal calculada sobre los rodillos prisioneros mediante el mecanismo de palanca pivotante tal como se indica en la figura, garantizando un arrastre continuo y sin deslizamientos en la zona de contacto.



a)



b) sistema de arrastre

Figura 65. a) Módulo de encolado; b) Sistema de arrastre neumático.

Estación de Corte de Extremos (End Cutting)

El módulo de corte final se implementó fijando la cuchilla de acero cromo-vanadio biselada a 30° sobre las guías de soporte mecanizadas. Este conjunto se vinculó directamente al vástago del cilindro neumático de doble efecto de Ø 50 mm seleccionado como se muestra en la Figura 66. La estación completa se calibró para posicionarse inmediatamente después de la zona de encolado, permitiendo que la guillotina realice el corte perpendicular de la cinta de manera instantánea al recibir la señal del sensor de contacto perimetral.

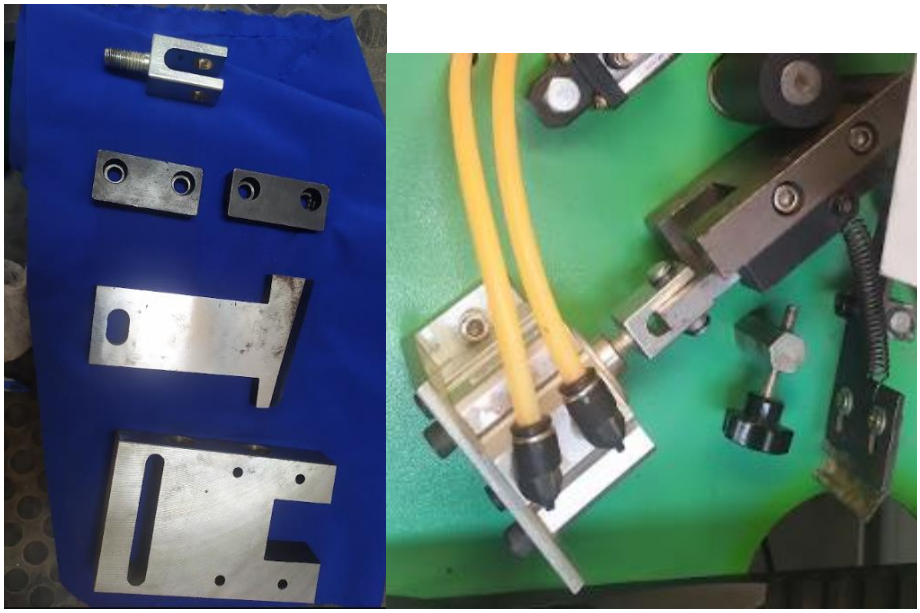


Figura 66. Subsistema de corte de extremos con actuador neumático principal

Estación de Recorte y Perfilado (Trimming)

La unidad doble de fresado se implementó montando dos tupis industriales de alta velocidad (1000-1200 W) sobre un sistema de guiado vertical de doble barra. El cabezal inferior se fijó rígidamente a la altura de la mesa base, mientras que el cabezal superior se acopló a un sistema móvil balanceado por dos resortes de compresión helicoidales de acero ASTM A228. Se incorporó un rodamiento seguidor de perfil rectificado en el cabezal móvil, el cual copia fielmente las variaciones de espesor del panel (entre 9 mm y 36 mm), permitiendo que las fresas rectas de carburo remuevan el excedente técnico de PVC sin generar rebabas ni dañar la lámina decorativa de melamina, se lo muestra en la Figura 67.



Figura 67. Subsistema de recorte y perfilado.

Implementación del Sistema Eléctrico, Electrónico y de Control

Tablero de Control e Instrumentación Eléctrica

La centralización de los elementos eléctricos se realizó en un gabinete metálico industrial con grado de protección adecuado para entornos con presencia de partículas de madera. En su interior, se distribuyeron las protecciones termomagnéticas, los contactores, los relés de potencia para las electroválvulas neumáticas y las fuentes de alimentación reguladas. Todo el cableado se canalizó a través de canaletas ranuradas respetando la normativa técnica de identificación de conductores y separación de líneas de potencia y control. En la parte frontal del tablero se ubicaron el interruptor general, los selectores de marcha del motor, de los tupis, indicador de la temperatura, indicador de contador de tiempo y los indicadores luminosos de estado como se muestra en la Figura 68.

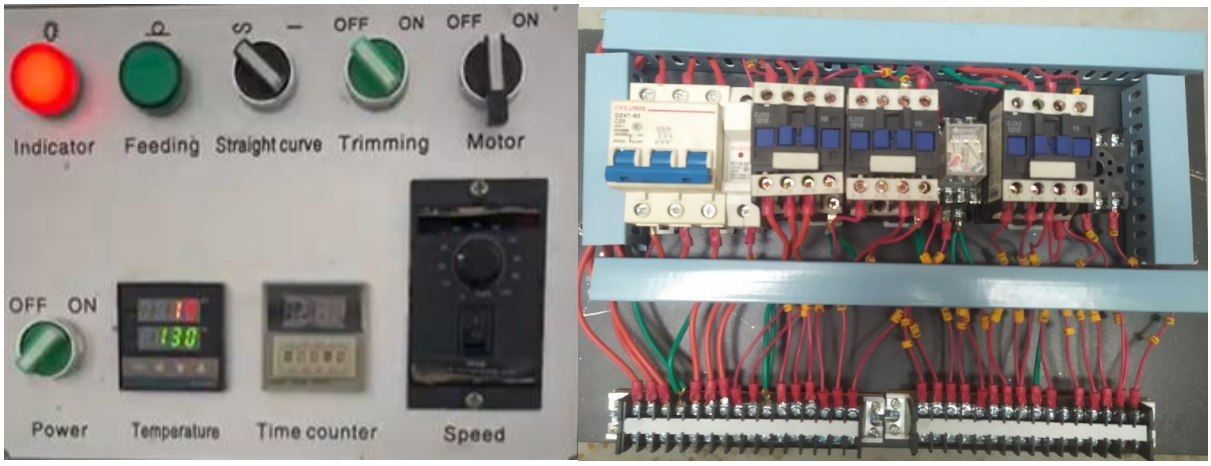


Figura 68. Distribución de componentes industriales y cableado.

Integración del Sistema de Control y Automatización

Para el control del calderín de pegamento Hot-Melt, se configuró el componente controlador de temperatura SRR REX c100 con los valores obtenidos para el PID como se muestra en la Figura 69, el cual recibe la lectura de una termocupla y conmuta las resistencias calefactoras tipo cartucho a través de relés de estado sólido, manteniendo la temperatura operativa estable dentro del rango óptimo de 130°C más menos 2°C para evitar la degradación o el enfriamiento del adhesivo.



Figura 69. Controlador de temperatura

Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Para la supervisión operativa del prototipo, se hizo una ventana HMI en la web, con el software Logo Web Editor de fácil acceso para el operador donde se visualiza el estado de que la máquina está energizada, estado de activación de los motores de fresado y los actuadores neumáticos.

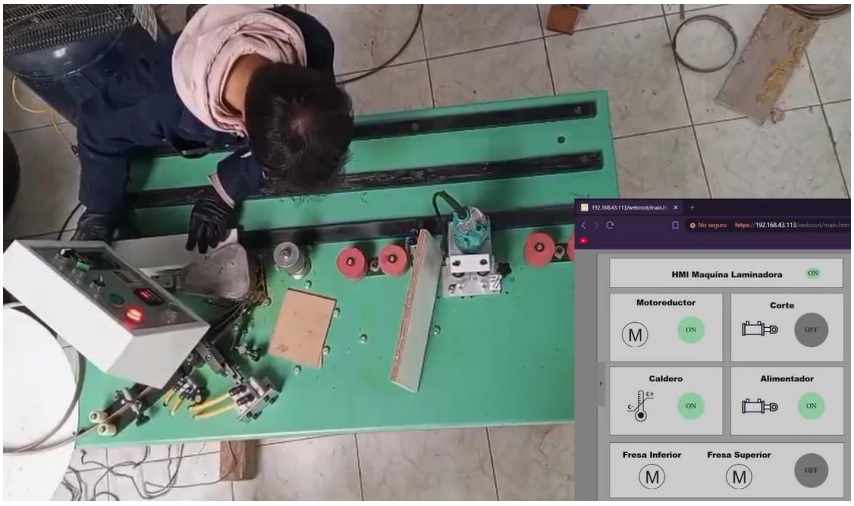


Figura 70. Interfaz gráfica de la venta web HMI operativa durante las pruebas del prototipo.

Capitulo IV

Pruebas y resultados

Control de temperatura

Objetivo

Evaluar el desempeño del controlador PID diseñado, comprobando su respuesta en estado estacionario y el porcentaje de error.

Factores

Tiempo de ciclo de encendido (ON time) para la acción integral: parámetro de configuración del REX-C100 independiente de las constantes PID, que determina la frecuencia de actuación del relé/salida para la acción I. Se utilizaron dos valores distintos entre ensayos: 5 s (Real 1) y 20 s (Real 2).

Variables de respuesta

- Temperatura (ºC) – medido por la termocupla y codificado por el controlador.
- Tiempo (s) – establecido por un cronometro.

Procedimiento experimental

1. Preparación:
    a. Configurar el controlador e ingresar los parámetros PID calculados
    b. Establecer el valor de temperatura
    c. Agregar pegamento termo fundible en el caldero.
2. Respuesta del controlador: Arrancar el sistema desde la temperatura ambiente y ver su respuesta transitoria y en estado estable.
3. Mediciones: Cada 15s registrar el cambio de temperatura.
4. Registro: Anotar los valores en una tabla con las variables de cada ensayo.

Diseño del experimento

El registro de los datos por cada 15 segundos se presenta en la Tabla 33**.**

Agregar tabla.

Análisis de resultados

Realizamos una comparación grafica entre los dos experimentos y su respuesta del pid simulado como se muestra en la Figura 71.

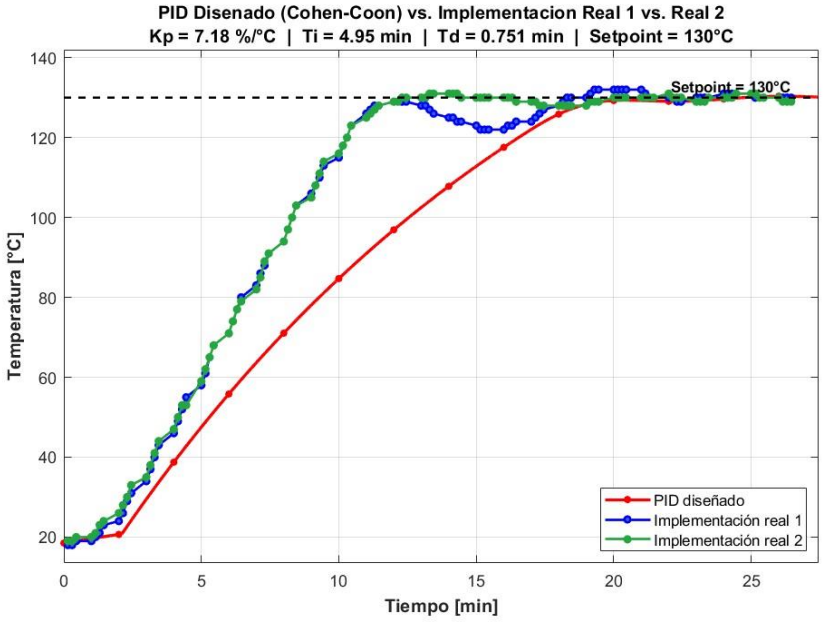


Figura 71. Respuesta controlador PID simulado e implementado.

Tabla 33.

Errores calculados entre la respuesta PID simulada y respuesta real

Métrica	Real 1 vs. Diseño	Real 2 vs. Diseño
RMSE (error cuadrático medio)	16.08 °C	16.92 °C
MAE (error absoluto medio)	11.15 °C	12.10 °C
Error máximo	35.46 °C (en t ≈ 10.45 min)	35.46 °C (en t ≈ 10.45 min)
Error medio en régimen permanente (t > 20 min)	0.83 °C	0.31 °C

El error es grande durante el transitorio (hasta 35 °C alrededor de los 10-11 min) porque la respuesta real sube más rápido que la simulada por el modelo FOPDT consistente con lo que ya vimos: Real 2 llega al setpoint en 12.3 min y Real 1 en 18.3 min, mientras el diseño lo hace cerca de los 20 min. Sin embargo, una vez que el sistema real se estabiliza, el error se reduce a menos de 1 °C, confirmando que el diseño y la implementación convergen correctamente en estado estable, aunque difieren en la dinámica transitoria.

Adicionalmente, se identificó que el comportamiento entre ambas implementaciones reales presenta diferencias notables al momento de alcanzar el setpoint, pese a haber utilizado los mismos parámetros PID (Kp, Ti, Td). Esto se debe a la configuración del tiempo de encendido (ON time) del relé de salida para la acción integral, parámetro propio del controlador REX-C100 e independiente de las constantes PID calculadas.

Ensayo de laminado: exceso de canto en los extremos

Objetivo

Evaluar el efecto del espesor del canto, la velocidad de avance y el tipo de material sobre el exceso de material en los extremos trasero y delantero de la pieza laminada, mediante

un diseño factorial 2^3 con 3 repeticiones, con el fin de identificar los factores y sus interacciones con mayor influencia sobre el proceso.

Factores

- Espesor del canto: 1.5 mm y 2.5 mm.
- Velocidad de avance: 20 y 40 (configuración del controlador del motorreductor).
- Tipo de material: PVC y ABS.
- Presión de rodillos: fija en 6 bar (nivel único, determinado en el ensayo de corte como el necesario para garantizar un corte correcto en todo el rango de espesores).
- Repeticiones: 3 por combinación (24 corridas totales), ejecutadas en orden aleatorizado.
- Variables de respuesta: exceso de canto en el extremo trasero (mm), exceso de canto en el extremo delantero (mm) y adherencia del canto al tablero (evaluada visualmente mediante intento de desprendimiento manual).

Procedimiento experimental

- Preparación: Configurar el espesor de canto, la velocidad de avance y el tipo de material según la corrida correspondiente del diseño aleatorizado; mantener la presión en 6 bar.
- Proceso que se está midiendo: Laminar la pieza y realizar el corte con la cizalla al finalizar el ciclo de avance.
- Mediciones: Medir el exceso de canto en los extremos trasero y delantero de la pieza; verificar la adherencia del canto intentando desprenderlo manualmente.
- Registro: Anotar los valores de exceso (mm) y el resultado de adherencia (1-5) para cada corrida.

Diseño del experimento

Vamos a aplicar el DOE factorial con 2 niveles y tres factores con 3 repeticiones y aleatorizado, eliminando sesgos sistemáticos de factores externos no controlados.

Se genero el diseño en Minitab y se procedió a realizar los experimentos, como se muestra en la Tabla *34*.

Tabla 34.

Doe factorial para el laminado y excesos de canto

Orden	Espesor	Velocidad	Material	Exceso Trasero	Exceso Delantero	Adherencia
1	1.5	20	ABS	5.94	2.19	4
2	1.5	20	ABS	7.92	2.27	5
3	1.5	20	PLC	7.07	1.63	4
4	2.5	20	ABS	6.18	2.95	5
5	2.5	40	PLC	7.75	9.64	4
6	2.5	20	PLC	6.34	5.43	5
7	1.5	20	ABS	7.43	6.67	4
8	2.5	20	PLC	6.78	4.56	5
9	1.5	40	PLC	8.64	8.81	4
10	2.5	40	ABS	6.05	7.15	3
11	1.5	20	PLC	5.08	2.67	5
12	1.5	40	ABS	7.91	7.73	3
13	1.5	40	ABS	8.32	9.31	4
14	2.5	20	ABS	8.12	3.67	4
15	1.5	40	PLC	7.25	8.69	3
16	1.5	20	PLC	6.87	5.78	5
17	1.5	40	PLC	6.84	8.45	4
18	2.5	40	ABS	8.33	7.68	4
19	2.5	20	PLC	6.12	3.15	5
20	1.5	40	ABS	6.07	9.14	4
21	2.5	40	PLC	6.56	9.43	4
22	2.5	40	ABS	5.96	8.94	3
23	2.5	20	ABS	7.25	2.67	4
24	2.5	40	PLC	7.18	9.26	3

Análisis de resultados

Se realizo un análisis factorial para el proceso de laminado, obteniendo los siguientes resultados en la Figura 72.

Para el exceso de canto trasero, el análisis de varianza nos muestra que ningún factor es significativo.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	4.2543	0.60776	0.62	0.730
Lineal	3	2.0657	0.68856	0.71	0.562
Espesor	1	0.3083	0.30827	0.32	0.582
Velocidad	1	1.3824	1.38240	1.42	0.251
Material	1	0.3750	0.37500	0.38	0.544
Interacciones de 2 términos	3	2.1646	0.72153	0.74	0.544
Espesor*Velocidad	1	0.5643	0.56427	0.58	0.458
Espesor*Material	1	0.0193	0.01927	0.02	0.890
Velocidad*Material	1	1.5811	1.58107	1.62	0.221
Interacciones de 3 términos	1	0.0241	0.02407	0.02	0.877
Espesor*Velocidad*Material	1	0.0241	0.02407	0.02	0.877
Error	16	15.6110	0.97569		
Total	23	19.8653			

Figura 72. Análisis de varianza del exceso de canto trasero

El diagrama de Pareto nos muestra que ningún factor ni interacción superó el umbral de significancia como se muestra en la Figura 73. El exceso en este extremo no depende de espesor, velocidad ni material dentro de los rangos evaluados; su variabilidad se atribuye a factores operativos no controlados.

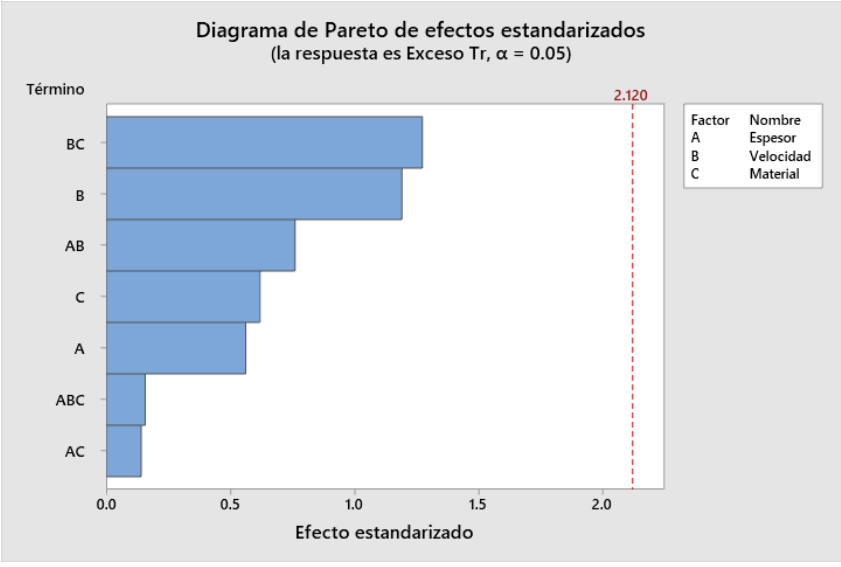


Figura 73. Diagrama de Pareto del exceso de canto trasero.

Esto se explica porque el exceso en este extremo está determinado principalmente por la configuración mecánica fija del sistema de arrastre, encolado y corte. Es decir, por la distancia fija entre el punto de arrastre, el rodillo aplicador de adhesivo y la cuchilla de la cizalla, más que por el espesor, la velocidad o el material del canto.

Para el caso del exceso delantero su comportamiento cambia, como se muestra en el análisis de varianza de la Figura 74.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	159.217	22.745	12.56	0.000
Lineal	3	155.142	51.714	28.55	0.000
Espesor	1	0.059	0.059	0.03	0.859
Velocidad	1	152.965	152.965	84.43	0.000
Material	1	2.118	2.118	1.17	0.296
Interacciones de 2 términos	3	4.075	1.358	0.75	0.538
Espesor*Velocidad	1	0.065	0.065	0.04	0.852
Espesor*Material	1	3.912	3.912	2.16	0.161
Velocidad*Material	1	0.098	0.098	0.05	0.819
Interacciones de 3 términos	1	0.001	0.001	0.00	0.987
Espesor*Velocidad*Material	1	0.001	0.001	0.00	0.987
Error	16	28.986	1.812		
Total	23	188.203			

Figura 74. Análisis de varianza del exceso de canto delantero.

El valor P nos indica que el factor más significativo es la velocidad de avance del canto que los demás factores e interacciones como se indica en la Figura 75.

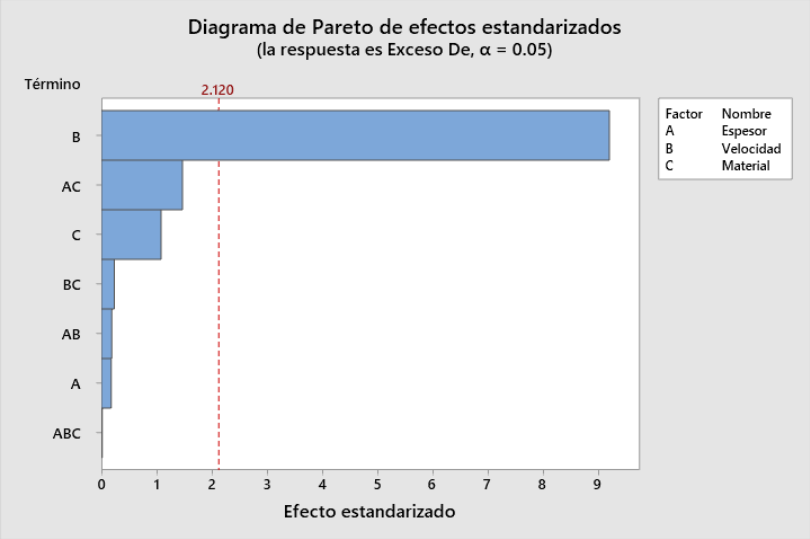


Figura 75. Diagrama de Pareto del exceso de canto delantero.

La velocidad de avance fue el único factor significativo, muy por encima del resto de términos. A mayor velocidad, menor tiempo de reacción del operario, gastando más canto al momento de la adherencia inicial.

Para la calidad de la adherencia del canto y el tablero observamos la siguiente Figura 76.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	7.1667	1.02381	3.51	0.018
Lineal	3	6.6667	2.22222	7.62	0.002
Espesor	1	0.0000	0.00000	0.00	1.000
Velocidad	1	6.0000	6.00000	20.57	0.000
Material	1	0.6667	0.66667	2.29	0.150
Interacciones de 2 términos	3	0.5000	0.16667	0.57	0.642
Espesor*Velocidad	1	0.1667	0.16667	0.57	0.461
Espesor*Material	1	0.1667	0.16667	0.57	0.461
Velocidad*Material	1	0.1667	0.16667	0.57	0.461
Interacciones de 3 términos	1	0.0000	0.00000	0.00	1.000
Espesor*Velocidad*Material	1	0.0000	0.00000	0.00	1.000
Error	16	4.6667	0.29167		
Total	23	11.8333			

Figura 76. Análisis de varianza de la calidad de adherencia.

El análisis de la varianza nos muestra nuevamente que el avance del tablero afecta al proceso y es más significativo que el resto de los factores y sus interacciones como indica en la Figura 77.

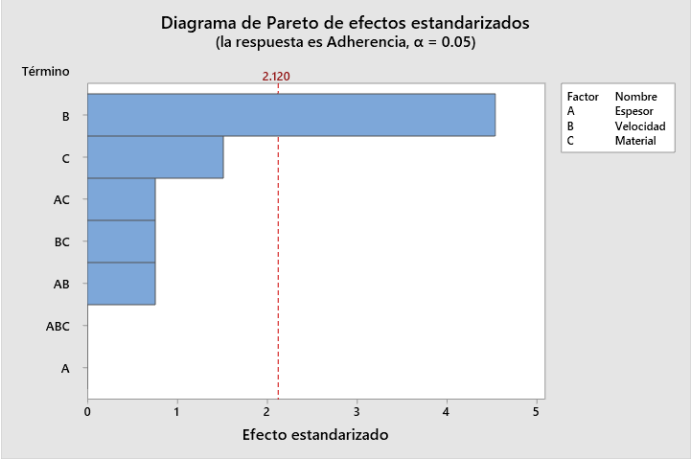


Figura 77. Diagrama de Pareto de la calidad de adherencia.

Nuevamente la velocidad de avance fue el único factor significativo, el espesor y material no influyeron. Esto se debe a que, a mayor velocidad, el encolado sobre el tablero resultó insuficiente: el adhesivo alcanzaba a fijar el canto, pero no lograba una fusión adecuada con la superficie del tablero, comprometiendo la adherencia.

Conclusiones

- Se diseñó, construyó e implementó exitosamente una máquina enchapadora de cantos semiautomática para Novocentro Cayambe, logrando la integración compacta y continua de los subsistemas de encolado, recorte y corte de extremos en un chasis único. Las pruebas operativas y el análisis experimental demostraron la viabilidad técnica y económica del prototipo, alcanzando un acabado de calidad industrial y optimizando los tiempos de procesamiento al sustituir el pegado manual por contacto por un proceso automatizado con adhesivo Hot-Melt.
- El estudio del arte de las tecnologías de laminado y la aplicación de la metodología VDI 2206 (complementada con herramientas QFD) permitieron definir los requerimientos funcionales y los parámetros operacionales óptimos para la máquina: procesamiento de cantos de 1,5 a 2,5 mm de espesor, velocidad nominal de avance de 5 m/min, presión neumática de 6 bar y temperatura del adhesivo termoplástico Hot-Melt en el rango de 130 °C a 160 °C. Estos parámetros fundamentaron la selección de componentes comerciales de alta disponibilidad y el reemplazo técnico de la goma de contacto manual.
- El diseño analítico y la simulación mecatrónica integraron efectivamente el módulo de encolado por calderín, la estación de recorte superior e inferior por tupís rotativos autocopiativos y la guillotina neumática de corte final en una bancada de acero ASTM A36, calculada para soportar esfuerzos mecánicos de flexotorsión y minimizar vibraciones dinámicas. Asimismo, la sintonización analítica del algoritmo PID en el controlador REX-C100 aseguró la estabilidad térmica de la masa adhesiva (1200 W de potencia instalada), alcanzando un error medio en régimen permanente de 0,31 °C para un tiempo de encendido de 20 s (configuración Real 2) frente a 0,83 °C para 5 s (Real 1), ambos inferiores a

1 °C. Durante la fase transitoria se registró un RMSE de 16,08 °C (Real 1) y 16,92 °C (Real 2), confirmando la convergencia del lazo cerrado sin degradación térmica del polímero

- Se desarrolló e implementó una interfaz gráfica HMI basada en servidor web embebido mediante Logo Web Editor y PLC Siemens, la cual permitió al operador visualizar en tiempo real y de manera remota el estado de energización general, la marcha del motorreductor de arrastre, la temperatura del calderín y la activación secuencial de los motores de fresado y actuadores neumáticos. Esto garantizó una herramienta de operación intuitiva, facilitando el diagnóstico preventivo de fallas y elevando la seguridad en planta al evitar la interacción directa con el tablero eléctrico principal.
- La construcción e integración física de los módulos mecánico, eléctrico, neumático y de automatización demostró la efectividad del ensamblaje del prototipo. La interconexión entre el sistema de arrastre por rodillos, el sensor de posición de entrada/salida del tablero, la guillotina neumática de acción rápida y el cabezal móvil de perfilado permitió obtener un flujo de enchapado continuo y coordinado, operando con la presión nominal de 6 bar sin atascos ni desalineaciones de material.
- La validación experimental mediante un diseño factorial 2^3 con 24 corridas demostró estadísticamente que el exceso de canto en el extremo trasero no se ve afectado por el espesor (1,5 y 2,5 mm), velocidad ni material (PVC/ABS), debido a la distancia geométrica fija entre el arrastre, el aplicador y la cuchilla de corte del prototipo. Por el contrario, la velocidad de avance se determinó como el único factor estadísticamente significativo sobre el exceso delantero y la adherencia del canto, al influir directamente en el tiempo de respuesta del sistema neumático y en la transferencia térmica del adhesivo. Se ratificó que a la

velocidad nominal de 5 m/min la máquina alcanza la máxima estabilidad de pegado y precisión dimensional, cumpliendo satisfactoriamente con los requerimientos técnicos de Novocentro Cayambe.

Recomendaciones

- Establecer un plan de mantenimiento preventivo enfocado en la limpieza periódica del rodillo aplicador y de las paredes internas del calderín térmico de pegamento, con el fin de retirar residuos carbonizados de *Hot Melt* que puedan obstruir los conductos de dosificación o alterar la transferencia de calor medida por el sensor de temperatura.
- Monitorear la calidad del aire comprimido suministrado al circuito neumático de la máquina a través de una unidad de mantenimiento (FRL), garantizando que la presión operativa se estabilice en los 6 bar calculados y que los actuadores SDA 20×15 y de corte de $\emptyset 50$ mm no sufran pérdidas por fricción o desgaste prematuro en sus juntas de estanqueidad.
- Instalar un sistema de extracción localizada de virutas y polvo de alta capacidad conectado directamente a las carcasas de protección de las estaciones de fresado de alta velocidad, evitando la acumulación de residuos plásticos sobre las guías lineales de precisión y reduciendo los riesgos ocupacionales para el operario.
- Evaluar el desempeño de la máquina con una mayor variedad de materiales de tapacanto, espesores y adhesivos Hot-Melt, ampliando el rango de validación experimental y determinando las condiciones óptimas de operación para cada aplicación.

- Se sugiere continuar con el desarrollo de futuras mejoras orientadas a incrementar el nivel de automatización del prototipo, incorporando nuevas funciones de control y monitoreo que permitan elevar la productividad y la repetibilidad del proceso industrial.

Referencias

Adamik, Ł. (2026). Evaluation of Melamine Coating Integrity on Particleboards. *Journal of Wood Science*.

Aguilera, P., & Sappa, A. (2018). Melamine Faced Panels Defect Classification beyond the Visible Spectrum. *Sensors*.

Anisuzzaman, S. M., et al. (2014). Performance of MUF particleboard in humid conditions. *International Journal of Chemical Engineering*.

Arauco. (2015). *Cómo Colocar Tapacantos: Manual de buenas prácticas para el acabado*.

Ayrılmış, N. (2012). Enhancement of dimensional stability of wood-based panels. *BioResources*.

Bardak, S. (2011). The effect of decor paper properties and adhesive type on wood composites. *Industrial Engineering Research*.

Başboğa, İ. H. (2023). Utilization of waste melamine paper as structural adhesive. *Forest Products Journal*.

Bioresources. (2025). *Lab testing for P3 moisture resistant boards*.

Blanchet, P., et al. (2005). Bark particleboard: particle geometry and melamine overlay performance. *Forest Products Journal*.

Cambazoğlu, M., et al. (2025). Carbon footprint evaluation of melamine-coated particleboard. *Environmental Science & Technology*.

COST EU. (2008). *Wood-Based Panels Technical Report: Standards and tolerances*.

Environdec. (2025). *EPD: Melamine faced particleboard certification*.

EPD Turkey. (2025). *Environmental Product Declaration: Melamine Faced MDF*.

FPL (USDA). (2010). *Wood Composites Handbook*.

Franco, M. P. (2024). *Physical-mechanical properties of MDP panels with melamine coating*.

Fraunhofer WKI. (2021). *Melamine faced panels overview and digital printing innovations*.

Globaldis. (2025). *Melamine faced board technical specifications*.

Hill, C. A. S. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*.

Hunt, C. G. (1974). *Wood Adhesion and Adhesives: Theories of mechanical anchoring*.

Int. Trade Centre. (2017). *Wood Product Standards and Quality for global export*.

Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. (1984). *Principles of Wood Science and Technology I*.

Long Term Plywood. (2025a). *How is melamine particle board laminated? Industrial stages*.

Long Term Plywood. (2025b). *Melamine particle board vs melamine MDF: Machining comparison*.

Medved, S., & Forštnarič, T. (2018). Formaldehyde barrier efficiency of melamine paper. *European Journal of Wood and Wood Products*.

Morocho, J., & Tasintuña, D. (2016). *Diseño de una enchapadora de canto para melamina* (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana.

Nemli, G., & Polat, S. (2009). Effect of press parameters on scratch and abrasion resistance. *Building and Environment*.

Pasantez, E. (2022). *Herramienta para colocar canto en talleres artesanales: Análisis de productividad*.

Pizzi, A. (2016). *Wood Adhesives: Chemistry and Technology*.

PMC / Aguilera. (2018). *Melamine surface finish classification using optical sensors*.

Revista M&M. (2017). *Mantenimiento del encolador de enchapadora: Protocolos técnicos*.

Rocplex. (2025). *Melamine faced MDF board applications in interior design*.

Rowell, R. M. (2013). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*.

Rydholm, S. A. (1993). *Wood Handbook: Reference for physical properties of panels*.

Sonae Arauco. (2020). *General recommendations for handling melamine faced boards*.

Sparkes, T. (2005). *The choosing of suitable decorative surface coating materials*.

UPS. (2016). *Diseño y construcción de una enchapadora de canto semiautomática* (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana.

UrsaImport. (2025). *Máquinas Pegadoras de Canto Woodfung: Catálogo Técnico*.

WEHO Machinery. (2024). *Materiales y compatibilidad para enchapadoras de cantos*.

Youngquist, J. (1999). *Wood-based Materials and Structures: Structural analysis*.

Zhang, J., et al. (2018). Formaldehyde emission of wood-based panels: Global regulations. *Atmospheric Environment*.

Apéndices