

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA CORTE DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO POR HILO CALIENTE DE 2500 mm DE
LONGITUD CON RECORRIDO DE 2600 mm EN EJE X y 1300 mm EN Y**

AUTORES:

JUAN CARLOS CASTILLO BRICEÑO

ROMEL FABIAN OBANDO QUITO

TUTORA:


NANCY VERÓNICA MORENO DIAGO

Quito, abril del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Juan Carlos Castillo Briceño con documento de identificación N° 172487111-4 y Romel Fabian Obando Quito con documento de identificación N° 171830581-4, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA CORTE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO POR HILO CALIENTE DE 2500 mm DE LONGITUD CON RECORRIDO DE 2600 mm EN EJE X Y 1300 mm EN Y”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Juan Carlos Castillo Briceño

C.I: 172487111-4



Romel Fabian Obando Quito

C.I: 171830581-4

Quito, abril 2018.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA CORTE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO POR HILO CALIENTE DE 2500 mm DE LONGITUD CON RECORRIDO DE 2600 mm EN EJE X Y 1300 mm EN Y”, realizado por: Juan Carlos Castillo Briceño y Romel Fabian Obando Quito, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, abril 2018.



.....

Ing. Nancy Verónica Moreno Diago MsC.

C.I.: 1758355307

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y cumplir este sueño, por darme salud para cumplir mis objetivos.

A mi madre Carmen, por siempre estar pendiente de mi formación sin importar la distancia, por su apoyo y amor incondicional.

A mi padre Manuel, por su apoyo incondicional, sus consejos sabios y por enseñarme que todo se logra con esfuerzo y perseverancia entre otras cosas importantes.

A mi hermana Lorena, por ser parte fundamental en mi vida, por brindarme su ayuda y amor en todo momento.

A mi novia Andrea, por su amor y apoyo en este camino recorrido para lograr cosas mejores.

A mi amigo Juan Carlos, por su paciencia y perseverancia en todo momento.

Romel Fabian Obando Quito

A Dios, por ser la fuerza espiritual que me ha guiado con salud y vida por el buen camino en todo momento.

A mis padres Alejandro y Luz, quienes a pesar de las dificultades siempre me han entregado su amor, apoyo y confianza en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos Santiago y Andrés, por estar siempre pendientes de mis pasos y apoyarme cuando más lo necesito.

A mi amada esposa Daniela, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y ayudarme a crecer como persona, por ser una gran compañera de vida y estar a mi lado en cada éxito y fracaso.

A Mateo, mi hijo y mi inspiración, por ser la fuerza que me impulsa a llegar más lejos de lo que me he propuesto.

A mi amigo Romel, por su constante esfuerzo para el logro de esta meta.

Juan Carlos Castillo Briceño

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana, especialmente a la Carrera de Ingeniería Mecánica de la cual obtuvimos la preparación para iniciar el camino de la excelencia profesional basados en valores morales y éticos.

A la Ingeniera Nancy Moreno MsC., quien con su experiencia y conocimientos supo guiarnos de principio a fin para alcanzar la meta planteada, le estaremos eternamente agradecidos.

A Tomas Verbik, quién nos brindó su apoyo incondicional para la construcción del proyecto.

Romel y Juan Carlos

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos:	4
a) Objetivo general.....	4
b) Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 1	5
MARCO TEÓRICO	5
1.1. Situación actual.....	5
1.2. Poliestireno expandido	7
1.2.1. Propiedades físicas	7
1.2.2. Aplicaciones del poliestireno expandido	8
1.3. Corte de poliestireno expandido mediante hilo caliente	8
1.4. Automatización por control numérico computarizado CNC	9
1.4.1. Factores que favorecen la implementación de un sistema CNC para el corte de poliestireno expandido	9
1.5. Alternativas de equipos CNC en el extranjero para corte de poliestireno expandido en base a requerimientos de trabajo	9
1.6. Selección de alternativa	10

1.7.	Sistema motriz	13
1.7.1.	Ejes de movimiento	13
1.7.2.	Sistema de transmisión	14
1.7.3.	Motores paso a paso.....	14
1.7.4.	Sistema de guiado.....	15
1.7.5.	Carros horizontales y verticales	15
1.8.	Estructura o bastidor.....	16
1.8.1.	Columnas	17
1.8.2.	Vigas	17
1.8.3.	Marcos Rígidos.....	17
1.8.4.	Uniones y conexiones	17
1.8.5.	Conexiones apernadas.....	17
1.8.6.	Juntas soldadas	18
1.9.	Sistema electrónico de control.....	18
1.10.	Sistema de corte	19
1.11.	Resultados del capítulo.....	20
CAPÍTULO 2	.....	21
CÁLCULO	.....	21
2.1.	Diseño del sistema mecánico	21
2.2.	Soporte vertical - Eje Y	22
2.2.1.	Análisis del elemento estructural vertical	22
2.2.2.	Diseño de perfiles de montaje vertical (PMV).....	27
2.2.3.	Diseño de uniones en perfiles de montaje vertical (PMV)	33
2.3.	Carro horizontal	38
2.3.1.	Análisis de perfil angular horizontal (PAH)	39
2.3.2.	Verificación de pernos de sujeción.....	43
2.3.3.	Comprobación de rodamientos lineales	45

2.4.	Carro vertical	49
2.5.	Sistema de transmisión.....	50
2.5.1.	Cálculo y selección de motores de pasos.....	50
2.5.2.	Cálculo y selección de la banda sincrónica dentada.....	56
2.5.3.	Selección de poleas tensoras	61
2.6.	Estructura o bastidor.....	61
2.6.1.	Marco rígido frontal – Eje X.....	62
2.6.2.	Mesa de trabajo.....	66
2.6.3.	Análisis de columnas	75
2.6.4.	Diseño de juntas soldadas	78
2.6.5.	Diseño de juntas apernadas	81
2.7.	Sistema de corte	83
CAPÍTULO 3	.....	86
COSTOS	.....	86
3.1.	Costos directos	86
3.2.	Costos de depreciación	91
3.3.	Flujo neto efectivo.....	92
3.4.	Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR)	95
3.5.	Valor actual neto (VAN)	96
3.6.	Tasa interna de retorno (TIR)	97
3.7.	Tiempo de recuperación de la inversión (PRI)	98
CAPÍTULO 4	.....	100
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	.....	100
4.1.	Estructura.....	100
4.2.	Soportes verticales y carros guía.....	100
4.3.	Transmisión con banda dentada	101
4.4.	Ensamble de elementos normalizados.....	101

4.5.Funcionamiento mecánico y pruebas de corte	102
Conclusiones.....	106
Recomendaciones	108
Referencias	109
Anexos	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Maquinaria CNC para corte de EPS en industrias locales	5
Tabla 1.2. Resumen de propiedades físicas del poliestireno expandido.	7
Tabla 1.3. Alternativas extranjeras de maquinaria CNC.....	10
Tabla 1.4. Matriz general de criterios.	11
Tabla 1.5. Comparación del área de trabajo entre las alternativas.	11
Tabla 1.6. Comparación de la facilidad de carga entre las alternativas.	12
Tabla 1.7. Comparación de la facilidad de carga entre las alternativas.	12
Tabla 1.8. Resumen global de criterios	12
Tabla 1.9. Resumen de resultados del capítulo I.	20
Tabla 2.1. Carga de los componentes verticales.....	28
Tabla 2.2. Resultados de análisis de PMV bajo acción de carga vertical C_v	31
Tabla 2.3. Resultados de análisis de PMV bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$	32
Tabla 2.4. Cargas aplicadas en uniones soldadas de PMV	34
Tabla 2.5. Resultados de análisis de PAH bajo acción de carga vertical C_v	41
Tabla 2.6. Resultados de análisis de PAH bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$	42
Tabla 2.7. Datos de movimiento y del actuador	51
Tabla 2.8. Carga vertical total	52
Tabla 2.9. Definiciones para cálculo de motor de pasos.....	52
Tabla 2.10. Detalle de componentes de la estructura.....	62
Tabla 2.11. Resultados de análisis de VFS bajo acción de carga vertical C_{VT}	65
Tabla 2.12. Resultados de análisis de VFS bajo acción de carga vertical C_{VT}	65
Tabla 2.13. Peso de tableros de madera de la mesa de trabajo.....	67
Tabla 2.14. Resultados de análisis de en viga UD-UA.....	71
Tabla 2.15. Resultados de análisis de en viga UB - UF.....	74
Tabla 2.16. Comparación esfuerzos-deflexión posiciones 1 y 2	74
Tabla 2.17. Resumen de cargas actuantes sobre estructura.....	75
Tabla 2.18. Lista de materiales para estructura	78
Tabla 2.19. Detalle de juntas soldadas en estructura.	79
Tabla 2.20. Detalle de juntas apernadas en estructura	81
Tabla 3.1. Costos de materiales para mesa de trabajo	86
Tabla 3.2. Costos de materiales para brazos verticales	86
Tabla 3.3. Costos de materiales y componentes para carros horizontales	87

Tabla 3.4. Costos de materiales y componentes para carros verticales	87
Tabla 3.5. Costos de componentes del sistema de transmisión vertical.....	87
Tabla 3.6. Costos de componentes del sistema de transmisión horizontal	88
Tabla 3.7. Costos de material eléctrico	88
Tabla 3.8. Costos de materiales consumibles	89
Tabla 3.9. Costos de mano de obra directa.....	90
Tabla 3.10. Costos de ingeniería y supervisión	91
Tabla 3.11. Detalle de depreciación.....	92
Tabla 3.12. Precio unitario de productos comercializados actualmente	93
Tabla 3.13. Ingresos estimados mensuales 2018	93
Tabla 3.14. Costos fijos.....	93
Tabla 3.15. Costos variables.....	94
Tabla 3.16. Egresos estimados 2018.....	94
Tabla 3.17. Flujo neto de efectivo	95
Tabla 3.18. Valores de inflación anual.....	96
Tabla 3.19. Valor actual neto y tasa interna de retorno	97
Tabla 3.20. Flujo neto y flujo acumulado del proyecto	98
Tabla 4.1. Tabla de corriente-temperatura	103
Tabla 4.2. Pruebas de corte.....	104
Tabla 4.3. Detalles de funcionamiento de los sistemas mecánicos	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Aplicaciones del poliestireno expandido.	8
Fig. 1.2. Filamento de nicrom.	8
Fig. 1.3. Esquema de ejes de movimiento X-Y-Z..	13
Fig. 1.4. Configuraciones para transmisión de correa y polea dentada..	14
Fig. 1.5. Motor paso a paso NEMA 23.....	14
Fig. 1.6. Guía lineal y carril tipo HSR.	15
Fig. 1.7. Sistema de guiado con ruedas.....	15
Fig. 1.8. Perfil estructural de aluminio anodizado.....	16
Fig. 1.9. Tubería estructural rectangular.....	17
Fig. 1.10. Junta apernada sometida a tensión.....	18
Fig. 1.11. Arriba: Soldadura de tope a tensión y a cortante. Abajo: Soldadura de filete..	18
Fig. 1.12. Placa Arduino UNO y Módulo CNC..	19
Fig. 2.1. Diseño detallado de los sistemas y componentes de la máquina.	21
Fig. 2.2. Izquierda: Soporte vertical montado. Derecha: Cargas actuantes.	22
Fig. 2.3. Esquema de fuerzas en elemento vertical.	23
Fig. 2.4. Viga con apoyos simples y carga en voladizo.....	23
Fig. 2.5. Diagramas de carga, corte y de momento resultantes del elemento vertical.	24
Fig. 2.6. Ejes de simetría de un perfil rectangular.....	25
Fig. 2.7. Detalle perfiles de montaje(a). Cargas actuantes en los perfiles (b).	27
Fig. 2.8. Distribución de cargas en PMV (a). Longitud del perfil (b).	29
Fig. 2.9. Cargas actuantes en el perfil de montaje (a). Vista extruida (b).	29
Fig. 2.10. Ratio del análisis en perfil de montaje vertical.	30
Fig. 2.11. Resultados de análisis en PMV bajo acción de carga vertical C_v	30
Fig. 2.12. Resultados de análisis en PMV bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$	31
Fig. 2.13. Vista superior de los elementos de unión y ubicación de la soldadura.	33
Fig. 2.14. Tipos de cordones de soldadura a tope..	33
Fig. 2.15. Detalle pernos de sujeción al elemento vertical.	36
Fig. 2.16. Detalle de pernos de sujeción al carro horizontal.	37
Fig. 2.17. Distribución de ruedas en el carro horizontal.	38

Fig. 2.18. Cargas que actúan en el patín superior del carro horizontal. Vista lateral. .	39
Fig. 2.19. Cargas que actúan en el patín superior del carro horizontal. Vista superior.	39
Fig. 2.20. Cargas actuantes en el perfil angular horizontal (a). Vista extruida (b). ...	40
Fig. 2.21. Ratio del análisis en perfil angular horizontal.	40
Fig. 2.22. Resultados de análisis en PAH bajo acción de carga vertical C_V	41
Fig. 2.23. Resultados de análisis en PAH bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$	42
Fig. 2.24. Detalle de sujeción con pernos M8.	43
Fig. 2.25. Cargas cortantes actuando en los pernos de sujeción.	44
Fig. 2.26. Detalle de rodamientos en sentido de las cargas aplicadas. C_B perpendicular a C_V	46
Fig. 2.27. Selección de rodamiento 628-2RZ.	47
Fig. 2.28. Características de rodamiento de bolas 628-2RZ.	47
Fig. 2.29. Selección de opciones de cálculo.....	48
Fig. 2.30. Entrada de los parámetros de funcionamiento.....	48
Fig. 2.31. Resultados obtenidos de análisis de rodamiento.	48
Fig. 2.32. Valores orientativos de vida útil especificada para diferentes tipos de máquinas.....	49
Fig. 2.33. Detalle carro vertical.	50
Fig. 2.34. Perfil trapecial de movimiento.....	54
Fig. 2.35. Simbología y definiciones catálogo Megalinear.....	56
Fig. 2.36. Fórmulas de cálculo catálogo Megalinear.....	57
Fig. 2.37. Diagrama de fuerzas de una transmisión tipo omega..	57
Fig. 2.38. Curvas para selección de paso de la banda dentada.....	57
Fig. 2.39. Polea motriz: Z, D_p y D_e	58
Fig. 2.40. Curvas para selección del ancho de la banda dentada..	58
Fig. 2.41. Distancia entre centros de una transmisión tipo omega.	59
Fig. 2.42. Componentes de la estructura de la máquina.	61
Fig. 2.43. Detalle de ensamble de carro horizontal sobre marco rígido frontal.	62
Fig. 2.44. Marco rígido frontal: (a) Dimensiones, (b) Juntas.	63
Fig. 2.45. Cargas actuantes en marco rígido frontal.	63
Fig. 2.46. Ratio del análisis en marco rígido frontal.	64
Fig. 2.47. Resultados de análisis en VFS bajo acción de carga vertical C_{VT}	64

Fig. 2.48. Resultados de análisis en VFS bajo acción de carga horizontal C_B	65
Fig. 2.49. Dimensiones de tableros de madera en la mesa de trabajo. Vista superior.	67
Fig. 2.50. Distribución de cargas de tableros MDP.	68
Fig. 2.51. Bloque de poliestireno expandido. Posición 1 (a). Posición 2 (b).	68
Fig. 2.52. Identificación de uniones de mesa de trabajo. Vista superior	69
Fig. 2.53. Carga distribuida del bloque de EPS en posición 1.	69
Fig. 2.54. Esquema de cargas actuantes en viga UD-UA.	70
Fig. 2.55. Ratio del análisis en viga UD-UA.	70
Fig. 2.56. Resultados de análisis en viga UD-UA.	71
Fig. 2.57. Carga distribuida del bloque de EPS en posición 2.	72
Fig. 2.58. Esquema de cargas actuantes en viga UB-UF.	72
Fig. 2.59. Ratio del análisis en viga UB-UF.	73
Fig. 2.60. Resultados de análisis en viga UB - UF.....	73
Fig. 2.61. Carga distribuida en elementos no analizados de la mesa de trabajo.	75
Fig. 2.62. Fuerzas resultantes en columnas de la estructura.	76
Fig. 2.63. Diagrama de carga de columna analizada.	77
Fig. 2.64. Uniones soldadas en mesa de trabajo. Vista superior.	79
Fig. 2.65. Vista superior de la junta soldada en el punto UB.	79
Fig. 2.66. Detalle de soldadura de filete..	80
Fig. 2.67. Distribución de juntas apernadas en la estructura.	81
Fig. 2.68. Junta apernada a tensión en E4.....	80
Fig. 2.69. Junta apernada a corte en UB.	82
Fig. 2.70. Detalle placa de montaje y perfil T perforado.	83
Fig. 2.71. Dimensiones perfil T aluminio Cedal..	84
Fig. 2.72. Resorte de tracción para los hilos de corte.	85
Fig. 2.73. Dimmer regulador de corriente eléctrica empleado en el proyecto.....	85
Fig. 4.1. Marco frontal a la izquierda y marco lateral a la derecha.	100
Fig. 4.2. Mesa de trabajo.	100
Fig. 4.3. Carro horizontal	98
Fig. 4.4. Carro vertical	101
Fig. 4.5. Banda dentada en transmisión tipo omega.	101
Fig. 4.6. Ensamble total de maquina CNC para corte de poliestireno expandido. .	102
Fig. 4.7. Acabado superficial a) Prueba 3 y b) Prueba 10.	105

RESUMEN

En el mercado nacional, para la elaboración de productos de poliestireno expandido con valor agregado es necesario el uso de máquinas de corte automatizado, adquiribles solo mediante importación y con costos elevados, de ahí que el propósito del presente proyecto consistió en diseño y construcción una máquina de corte automatizado por tecnología de CNC con un costo más asequible para ser implementada en una microempresa en la ciudad de Quito.

Para establecer los requerimientos técnicos se evaluó la situación del empleo de este tipo de máquinas en nuestro país, por lo que se visitó dos empresas locales a fin de obtener información relevante. Se complementó con la selección de una alternativa de máquina extranjera para facilitar la elección de los sistemas de transmisión, guiado y generación de movimiento.

El diseño se enfoca en el cálculo de los elementos estructurales, juntas apernadas y soldadas y la selección de los componentes de transmisión y desplazamiento. Después del análisis de costos e indicadores de rentabilidad, se realizó la construcción de la máquina mediante procesos de fabricación tradicionales. Durante la fase de pruebas se empleó hilos de corte de calibre 26 y 30 AWG para determinar las condiciones más adecuadas para el corte.

Los resultados más importantes indican un factor de seguridad mínimo de 20 en sus elementos estructurales, empleo de un 98% de materiales y componentes nacionales para un costo final de la máquina de \$2822,99 y las condiciones adecuadas de corte con una corriente de 2,3 Amperios (175°C) y una velocidad promedio de corte de 475 mm/min.

Palabras clave: corte por hilo caliente, tecnología CNC, poliestireno expandido.

ABSTRACT

In the national market, for the elaboration of expanded polystyrene products with added value it is necessary to use automated cutting machines, acquirable only by importation and with high costs, hence the purpose of the present project consisted of designing and building a machine of automated cutting by CNC technology with a more affordable cost to be implemented in a microenterprise in the city of Quito.

To establish the technical requirements, the employment situation of this type of machines in our country was evaluated, so two local companies were visited in order to obtain relevant information. It was complemented by the selection of a foreign machine alternative to facilitate the choice of transmission, guidance and movement generation systems.

The design focuses on the calculation of structural elements, bolted and welded joints and the selection of transmission and displacement components. After cost analysis and profitability indicators, the construction of the machine was carried out through traditional manufacturing processes. During the testing phase, 26 and 30 AWG gauge cutting wires were used to determine the most suitable conditions for cutting.

The most important results indicate an average safety factor of 22,34 in its structural elements, use of 98% of national materials and components for a final machine cost of \$ 2822,99 and the appropriate cutting conditions with a current of 2, 3 Amps (175 ° C) and an average cutting speed of 475 mm / min.

Keywords: hot wire cutting, CNC technology, expanded polystyrene.

INTRODUCCIÓN

El poliestireno expandido (EPS, Expanded PolyStirene) es un plástico espumado empleado en la industria nacional principalmente en sector alimenticio y debido a sus propiedades físicas es factible de ser utilizado en otras aplicaciones. Para obtener productos de poliestireno expandido con valor agregado es necesario el empleo de máquinas de corte automatizado, disponibles en ciertos países de Europa y en Estados Unidos con un alto costo y por lo tanto con acceso limitado.

Debido a que en nuestro país es muy reducido el número de empresas que emplean este tipo de maquinaria para la elaboración de productos de poliestireno expandido y a que actualmente la tecnología basada en el control numérico computarizado o CNC se ha vuelto accesible para todas las personas interesadas en su aplicación, se encontró la oportunidad de construir una máquina automatizada con componentes disponibles localmente para ser implementada en el emprendimiento de uno de los realizadores de este proyecto en la ciudad de Quito.

En ese sentido, el presente proyecto se enfoca en el diseño y construcción de una máquina para el corte de poliestireno expandido mediante hilo caliente utilizando materiales y componentes disponibles en el mercado local, los cuales satisfacen los requerimientos para la fabricación de este tipo de maquinaria que se complementa con la automatización mediante tecnología CNC basada en hardware y software libres.

La técnica de corte mediante hilo caliente es la más adecuada para obtener un buen acabado superficial en secciones de poliestireno expandido de cualquier tamaño y al emplearse de forma automatizada permite obtener productos de alta calidad a la vez que se incrementa la eficiencia del proceso, de esta manera se apoya el cambio de la matriz productiva en el país.

Objetivos:

a) Objetivo general

- Diseñar y construir una máquina CNC para corte de poliestireno expandido por hilo caliente de 2500 mm de longitud con recorrido de 2600 mm en eje X y 1300 mm en eje Y.

b) Objetivos específicos

- Evaluar la situación actual del empleo de máquinas CNC para corte de poliestireno expandido en el mercado nacional.
- Seleccionar entre los fabricantes extranjeros la alternativa factible basada en aspectos técnicos requeridos para el diseño y construcción.
- Identificar oportunidades de mejoras que se pueda implementar a la alternativa seleccionada.
- Diseñar los sistemas y mecanismos de la maquina en base a la alternativa seleccionada.
- Seleccionar los sistemas electromecánicos, electrónicos y de control adecuados para el diseño de la máquina.
- Realizar un estudio de costos del diseño y construcción de la maquina CNC para corte de poliestireno expandido.
- Realizar las pruebas y ensayos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO



1.1. Situación actual

En el mercado nacional existe un amplio campo de aplicaciones para el poliestireno expandido, que como materia prima es utilizado principalmente en la industria alimenticia, aplicaciones de construcción, entre otras. En nuestro país se encontró las siguientes empresas que han requerido importar máquinas automatizadas con altos costos de adquisición:

- Poliexpandidos, ubicada en la ciudad de Quito [1].
- Industrias Verton, ubicada en la ciudad de Quito [2].
- Plastex, ubicada en la ciudad de Quito [3].
- Aislapol, ubicada en el km 9 ½ vía a Daule [4]
- Panecons, ubicada en la provincia de Cotopaxi [5].

Debido a la localización, se ha consultado con dos empresas ubicadas en la ciudad de Quito para conocer los detalles de las máquinas que emplean en sus procesos como se indica en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1.
Maquinaria CNC para corte de EPS en industrias locales

Empresa	Modelo	Máquina
Verton Poliuretanos	CROMA Serie profesional [6].	
Poliexpandidos Cia. Ltda.	Hotwire direct 8600 CNC [7].	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La máquina CROMA Serie profesional posee las siguientes características de acuerdo a su catálogo [8] :

- País de origen: Francia.
- Capacidad de corte: 250*159*267 cm (Longitud*Altura*Ancho).
- Carga de material desde todos los lados de la máquina, excepto para máquinas equipadas con torno horizontal.
- Velocidad máxima de 2,7 m/min en desplazamiento libre y 2 m/min en corte.
- Precisión: $\pm 1,0$ mm
- Resolución: 0,2 mm
- Software disponible en francés, inglés y alemán.
- Motores de accionamiento: Seis steppers de 5 kg/cm.
- Sistema de manejo: Transmisiones de correa de distribución del eje X e Y
- Alimentación eléctrica: 230 VCA / 50 Hz o (115 VCA / 60 Hz bajo pedido).
- Consumo de energía: de 600 VA a 1700 VA.
- Precio: USD 40000,00.

La máquina Hotwire direct 8600 CNC posee las siguientes características de acuerdo a su sitio web [9]:

- País de origen: Estados Unidos.
- Capacidad de corte: 269*130*266 cm (Longitud*Altura*Ancho).
- Carga de material desde todos los lados de la máquina.
- Velocidad máxima: En corte 140cm/min, en vacío 2032 cm/min.
- Precisión: 0,0167 mm.
- Resolución: 0,025 mm.
- Software disponible en inglés.
- Motores de accionamiento: Cuatro steppers de alta precisión de 2,1 kg/cm.
- Sistema de manejo: Transmisiones de correa de distribución del eje X e Y.
- Alimentación eléctrica: 110v - 120v monofásico 50-60 Hz, 20 amperios.
- Consumo de energía: de 700 VA a 2400 VA.
- Precio: USD 43995,00

De las características proporcionadas por cada máquina hay que destacar que poseen dimensiones y precio similares a pesar de proceder de diferentes países. Con estas dimensiones tienen capacidad para cortar un bloque estándar de poliestireno

expandido que en el mercado nacional tiene unas dimensiones de 2,50*1,20*0,6 m, de esta manera estas empresas pueden elaborar diversos productos con altos volúmenes de producción manteniendo la calidad y eficiencia del proceso.

1.2. Poliestireno expandido

El poliestireno expandido (EPS, Expanded PolyStirene) es un plástico espumado rígido que consiste de 5% de poliestireno y 95% de aire [10].

En la Tabla 1.2 se puede observar un resumen de las propiedades físicas más importantes a considerarse para el uso del poliestireno expandido.

1.2.1. Propiedades físicas

Tabla 1.2.
Resumen de propiedades físicas del poliestireno expandido.

Propiedades	Norma	Unid.	Valores margen de oscilación		
Densidad nominal	EN-1602	kg/m ³	15	25	35
Densidad mínima	DIN-EN-1602	kg/m ³	15	20	30
Resistencia permanente a la compresión con una deformación del 2%	ISO 785	kPa	20-30	35-50	70-90
Resistencia a la flexión	DIN-EN 12089	kPa	150–230	250–310	430–490
Resistencia al cizallamiento	DIN 53427	kPa	80–130	120–170	210–260
Resistencia a la tracción	DIN-EN 1608	kPa	160–260	230–330	380–480
Estabilidad dimensional al calor a corto plazo	—	°C	100	100	100
Estabilidad dimensional al calor a largo plazo	—	°C	75	80	80

Fuente: Styropor. Informaciones Técnicas [11].

Las industrias locales producen bloques estándar de poliestireno expandido con unas dimensiones de 2,50*1,20*0,60 metros de largo, ancho y altura respectivamente. Las densidades de estos bloques que según del proveedor pueden ser de 13, 15, 20 y 30 kg/m³.

1.2.2. Aplicaciones del poliestireno expandido

La versatilidad del poliestireno expandido permite que sea utilizado en los siguientes campos [12] con aplicaciones como se puede observar en la Figura 1.1:

- Construcción
- Escenografía y modelado
- Envases térmicos para cadena de frío
- Modelos de fundición



Fig. 1.1. Aplicaciones del poliestireno expandido [13].

1.3. Corte de poliestireno expandido mediante hilo caliente



Fig. 1.2. Filamento de nicrom [7].

El corte por hilo caliente funciona mediante el uso de un filamento de aleación de 80% níquel y 20% cromo [14] comercialmente conocido como nicrom, con la apariencia que se puede observar en la Figura 1.2, con calibre de clasificación de la American Wire Gauge (AWG) a través del cual circula una corriente eléctrica provocando el aumento de temperatura.

De acuerdo a las dos industrias locales visitadas, el calibre de filamento más empleado es el 26 AWG de sección circular debido a que resulta adecuado para el corte en general. Este tiene un diámetro de 0,4 mm y requiere una corriente de 1,67 A/m para alcanzar una temperatura de 100 °C [15] que es la temperatura a la cual se altera la estabilidad dimensional del poliestireno expandido como se puede observar en la Tabla 1.2.

1.4. Automatización por control numérico computarizado CNC

Se considera control numérico computarizado a todo dispositivo capaz de dirigir posicionamientos de un elemento mecánico móvil, en el que las órdenes relativas para los desplazamientos son elaboradas en forma automática a partir de un programa [16].

1.4.1. Factores que favorecen la implementación de un sistema CNC para el corte de poliestireno expandido

- Exigencia del mercado por productos con formas de alta complejidad y precisión.
- Reducción de tiempos de producción y productos con cortes defectuosos.
- Fácil acceso a componentes electrónicos, mecánicos y software para la fabricación de sistemas CNC a bajo costo.

1.5. Alternativas de equipos CNC en el extranjero para corte de poliestireno expandido en base a requerimientos de trabajo

De acuerdo a las condiciones de trabajo de las máquinas CNC para el corte de poliestireno expandido según empresas locales visitadas, se establecen los siguientes requerimientos:



- Poseer un área de trabajo con capacidad de cortar un bloque estándar de poliestireno expandido en cualquier posición.
- Permitir una carga fácil de la materia prima a la superficie de trabajo, de preferencia sin columnas estructurales en las esquinas de la máquina.

Se da más importancia a estas características debido a que influyen directamente en la cantidad de material que puede ser procesado y su forma de manipulación.

En el diseño de este proyecto se tomará como referencia los componentes y la configuración mecánica de maquinaria extranjera con características similares, para

ser adaptadas a materiales disponibles a nivel nacional. Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3.
Alternativas extranjeras de maquinaria CNC

Modelo	Máquina	Características
Plot 2500 [17]		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 2,5*1,21*2m - Sin columnas esquineras. - Transmisión por banda dentada. - Sistema de guías lineales. - Estructura no desarmable
Cut 2910s [18]		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 1,3*1,3*2,1m - Sin columnas esquineras. - Transmisión por banda dentada. - Guías lineales. - Estructura no desarmable - Motores de pasos (4)
FrogWire [19]		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 2,5*1,3*2,5m - Sin columnas esquineras. - Transmisión por banda dentada. - Guías lineales. - Estructura desarmable - Motores de pasos (4)

Fuente: Nettuno Sistemi [17], Streamline Automation [19] y Cnc multitool GmbH [18].

1.6. Selección de alternativa

Se realizará mediante matrices de priorización las cuales permiten tomar decisiones de forma objetiva. Son herramientas que se utilizan para priorizar características de productos en base a criterios de ponderación conocidos [20]. Los criterios de selección son los siguientes:

- Área de trabajo (Para procesar bloque estándar en cualquier posición).
- Facilidad de carga de material (Bastidor sin columnas esquineras).
- Facilidad de movilización (Estructura desarmable).

Se considera los siguientes valores numéricos para evaluar los criterios:

- 1 Igual de importante
- 5 Significativamente importante
- 10 Excesivamente más importante
- 0,2 Significativamente menos importante
- 0,1 Excesivamente menos importante

De los tres criterios propuestos se consideran más importantes el de área de trabajo y el de fácil carga del material debido a que son condiciones que influyen en el proceso de trabajo con la máquina, mientras que la movilidad se daría eventualmente en un cambio de instalación. La comparación entre criterios se puede observar en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4.
Matriz de comparación de criterios.

Criterio	Área de trabajo	Fácil carga	Fácil movilización	Suma	Ponderación
Área de trabajo		1	5	6	0,484
Fácil carga	1		5	6	0,484
Fácil movilización	0,2	0,2		0,4	0,032
TOTAL				12,4	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En las Tablas 1.5, 1.6 y 1.7 se pueden observar la comparación entre las alternativas respecto a cada criterio para obtener un valor numérico ponderado.

Tabla 1.5.
Comparación del área de trabajo entre las alternativas.

Área de trabajo	Plot 2500	Cut 2910s	FrogWire	Suma	Ponderación
Plot 2500		5	0,2	5,2	0,254
Cut 2910s	0,2		0,1	0,3	0,015
FrogWire	5	10		15	0,732
TOTAL				20,5	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 1.6.

Comparación de la facilidad de carga entre las alternativas.

Fácil carga	Plot 2500	Cut 2910s	FrogWire	Suma	Ponderación
Plot 2500		5	1	6	0,293
Cut 2910s	0,2		0,2	0,4	0,020
FrogWire	1	5		6	0,293
			TOTAL	12,4	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 1.7.

Comparación de la facilidad de carga entre las alternativas.

Fácil movilización	Plot 2500	Cut 2910s	FrogWire	Suma	Ponderación
Plot 2500		1	0,2	1,2	0,059
Cut 2910s	1		0,2	1,2	0,059
FrogWire	5	5		10	0,488
			TOTAL	12,4	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 1.8 se puede observar la matriz global de criterios, en la que se determina el orden de conveniencia, en ese sentido se tiene que el modelo FrogWire es la mejor alternativa con un valor de 0,512 para ser utilizada como referencia para el diseño del proyecto.

Tabla 1.8.

Resumen global de criterios

Criterios	Área de trabajo	Fácil carga	Fácil movilización	Suma	Orden de conveniencia
Alternativa	0,484	0,484	0,032		
Plot 2500	0,254	0,293	0,059	0,267	2
	0,123	0,142	0,002		
Cut 2910s	0,015	0,020	0,059	0,019	3
	0,007	0,010	0,002		
FrogWire	0,732	0,293	0,488	0,512	1
	0,354	0,142	0,016		

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En el Anexo 1 se puede observar las características técnicas del modelo FrogWire. Para el diseño de este proyecto se han considerado los siguientes sistemas:

- Sistema motriz.
- Estructura o bastidor.

- Sistema electrónico de control.
- Sistema de corte

1.7. Sistema motriz

El sistema motriz involucra la identificación de los ejes de movimiento de la máquina y el diseño y selección de los siguientes elementos:

- Sistema de transmisión.
- Motores a pasos.
- Sistema de guiado
- Carros horizontales y verticales.

1.7.1. Ejes de movimiento

En una máquina CNC o convencional los ejes de movimiento son las direcciones en las que se mueve la herramienta o el material a trabajar, dependiendo de la concepción de la máquina.

Como se puede observar en la Figura 1.3, en una máquina CNC para corte de poliestireno expandido estos ejes se distribuyen de la siguiente manera:

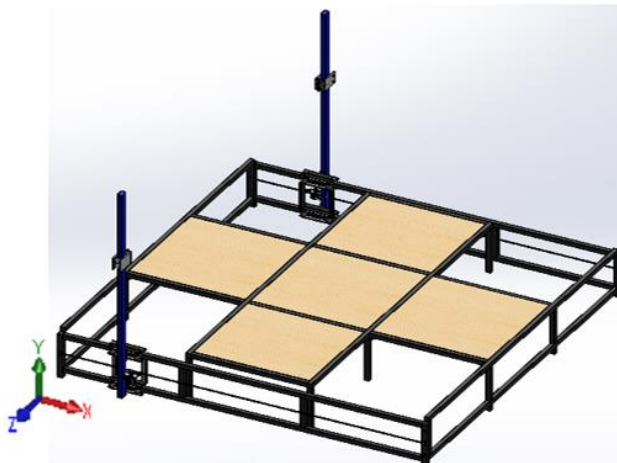


Fig. 1.3. Esquema de ejes de movimiento X-Y-Z. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

- Eje X: Es la dirección de desplazamiento horizontal de los brazos verticales que sujetan al hilo de corte por los extremos
- Eje Y: Es la dirección de desplazamiento a lo largo de los brazos verticales del dispositivo sujetador del hilo de corte.
- Eje Z: Es paralelo al hilo de corte.

1.7.2. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión se encarga de convertir el movimiento rotatorio de los motores de paso en desplazamiento lineal de los carros horizontal y vertical. En la Figura 1.4 se observa como las correas dentadas en unión con las ruedas dentadas correspondientes garantizan una transmisión de fuerza sin resbalamiento. Las correas son fabricadas de una combinación de polímeros y acero mientras que las ruedas dentadas pueden ser de algún metal ligero [21].

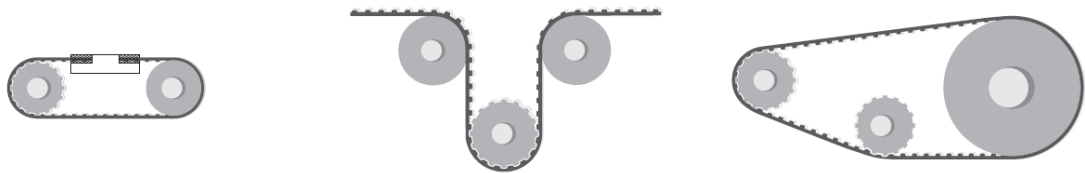


Fig. 1.4. Configuraciones para transmisión de correa y polea dentada. Fuente: Megalinear pág.15 [22].

1.7.3. Motores paso a paso

En la Figura 1.5 se puede observar un motor de pasos, el cual es un actuador de corriente continua que realiza avances angulares constantes en ambos sentidos de rotación [23]. De acuerdo al torque requerido los motores pueden ser del tipo NEMA 17, 23 o 34, siendo estos últimos los que mayor torque pueden ofrecer. NEMA son las siglas en inglés de la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de Estados Unidos.

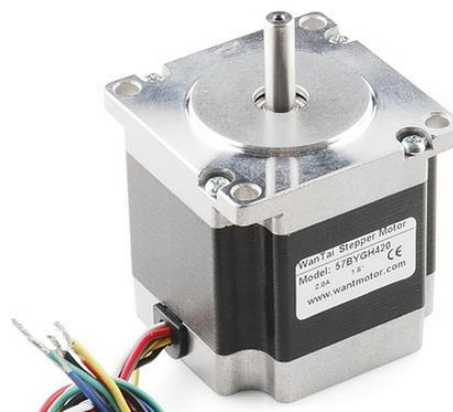


Fig. 1.5. Motor paso a paso NEMA 23. Fuente: Electan [24].

1.7.4. Sistema de guiado

De la alternativa de referencia, se identificó que emplea guías lineales cuadradas como se puede observar en la Figura 1.6. Posee la ventaja de soportar cargas en múltiples direcciones.

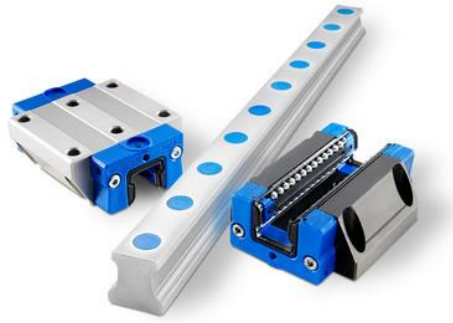


Fig. 1.6. Guía lineal y carril tipo HSR. Fuente: Thomson Linear Motion [25].

Sin embargo, este tipo de guías requieren ser importadas con un alto costo y tiempo de entrega, por lo que su aplicación no es viable en el presente proyecto.

Una alternativa más económica es la que se puede observar en la Figura 1.7, en la que mediante un conjunto de rodillos y perfiles se usa la estructura como base de guía. Los componentes de este tipo de sistema son de fácil adquisición en el mercado local, mantiene una baja fricción y una buena precisión en el desplazamiento.



Fig. 1.7. Sistema de guiado con ruedas. Fuente: <http://www.cientificosaficionados.com> [26].

1.7.5. Carros horizontales y verticales

Están compuestos por el sistema de guiado y placas o perfiles de soporte. Los carros horizontales se encargan de soportar el sistema de movimiento vertical y sus componentes. Los carros verticales llevan a los perfiles que soportan el alambre de corte a tensión.

1.8. Estructura o bastidor

En el presente proyecto la estructura debe cumplir los siguientes requisitos:

- Soportar el peso de un bloque de materia prima y de los tableros de madera de media densidad (MDP) que componen la base.
- Mantener rigidez mecánica.
- Permitir el montaje de los demás componentes de la máquina.
- Permitir fácil transporte y ensamblado.
- Permitir fácil montaje de la materia prima.

En estas estructuras es muy común el uso de perfiles estructurales de aluminio anodizado cuya geometría se puede observar en la Figura 1.8. Este tipo de perfiles ofrecen facilidad para ser ensamblados mediante uniones apernadas y poseen canales en sus caras que sirven de guía para ruedas de elementos móviles [27]. Sin embargo su precio es muy elevado respecto a los perfiles de acero, por lo cual su aplicación no es factible en el presente proyecto.



Fig. 1.8. Perfil estructural de aluminio anodizado. Fuente: Andon Equipos Industriales [27].

De acuerdo a la alternativa seleccionada de referencia, esta no emplea perfiles de aluminio estructural, en ese sentido se considera emplear perfiles tubulares de acero como los que muestra la Figura 1.9. Las principales ventajas de este tipo de perfiles son:

- Facilidad de adquisición a precios económicos.
- Facilidad de unión por juntas apernadas o soldadas.
- Amplio rango de secciones cuadradas y rectangulares.
- Permiten la aplicación de recubrimientos de protección ambiental.
- Permiten el montaje de otros elementos mecánicos.

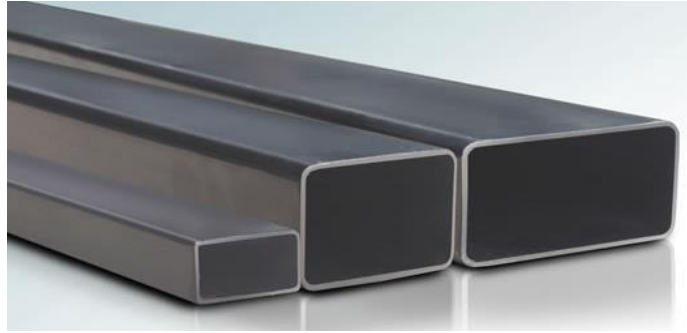


Fig. 1.9. Tubería estructural rectangular. Fuente: IPAC [28].

1.8.1. Columnas

Las columnas son miembros verticales rectos cuyas longitudes son considerablemente mayores que su ancho. Los miembros verticales cortos sujetos a cargas de compresión se denominan con frecuencia puntales o, simplemente, miembros a compresión [29]. En el presente caso es importante determinar las cargas que actuarán sobre los miembros cortos a compresión y el tipo de conexión de extremo. La esbeltez no es un factor crítico al tratarse de miembros cortos.

1.8.2. Vigas

Generalmente se dice que las vigas son miembros que soportan cargas transversales. Se usan generalmente en posición horizontal y quedan sujetas a cargas por gravedad o verticales [29].

1.8.3. Marcos Rígidos

Están formados por la unión de vigas y columnas en forma perpendicular mediante soldadura o pernos. El conjunto trabaja a flexión o flexo-compresión [30].

1.8.4. Uniones y conexiones

Permiten ensamblar diferentes partes de una estructura en función del fin con la que esta fue diseñada y de su costo. El presente proyecto requiere una estructura rígida que no permita vibraciones que afecten al trabajo de la máquina a la vez que permita una facilidad de montaje, desmontaje y transporte. De acuerdo al tipo de juntas empleados en este tipo de maquinarias, se consideran las juntas apernadas y juntas soldadas.

1.8.5. Conexiones apernadas

Se emplean cuando se desea realizar una conexión que se pueda desensamblar sin el empleo de métodos destructivos y que sea suficientemente fuerte para resistir cargas

externas de tensión como se puede observar en la Figura 1.10, cargas debidas a momentos y cargas de cortante, o una combinación de ellas [31].

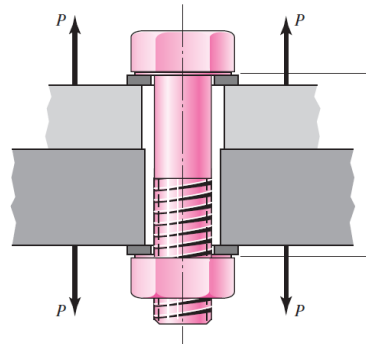


Fig. 1.10. Junta apernada sometida a tensión. Fuente: Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.411 [31].

1.8.6. Juntas soldadas

Una junta soldada se fabrica soldando en conjunto un grupo de formas de metal, cortadas con configuraciones particulares. [31]. Los tipos más comunes de soldadura son los de filete y a tope como se puede observar en la Figura 1.11, sin embargo en el capítulo II se analizará aspectos el tipo de soldadura, tipo de electrodo, dimensiones del cordón que sean más adecuados de acuerdo a los requerimientos de la estructura.

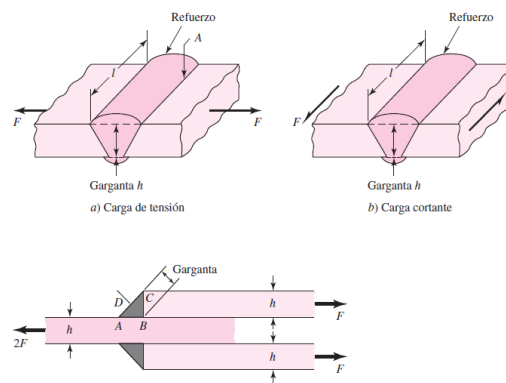


Fig. 1.11. Arriba: Soldadura de tope a tensión y a cortante. Abajo: Soldadura de filete. Fuente:

Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.461 [31].

1.9. Sistema electrónico de control

Debido a la influencia del hardware y software libre, cuya filosofía pretende mantener un diseño libre y compartido con diseñadores de todo el mundo, la tecnología CNC se ha vuelto más accesible, complementada por quienes aportan sus recursos técnicos, energía y creatividad de forma dinámica y participativa [32].

Existe una gran cantidad de opciones de hardware y software libres que dependen de los requerimientos y presupuesto del proyecto. Para el presente proyecto se ha considerado utilizar una placa de Arduino Uno debido a que es económica, de fácil adquisición a nivel nacional y posee una amplia comunidad de colaboradores en todo el mundo. La Figura 1.12 muestra una placa Arduino Uno con el módulo para CNC que permite el control de hasta 4 motores de pasos.

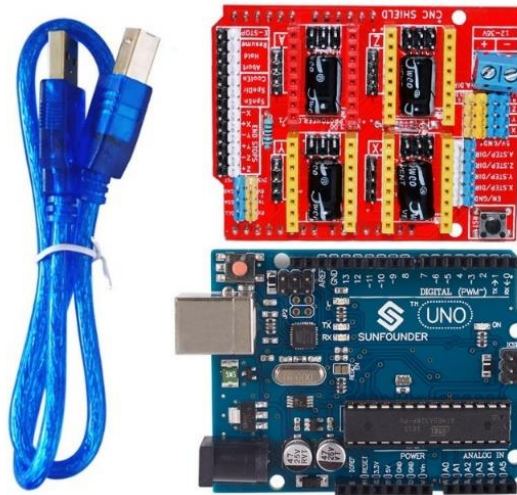


Fig. 1.12. Placa Arduino UNO y Módulo CNC. Fuente: SunFounder [33].

1.10. Sistema de corte

La función de este sistema es proporcionar la energía eléctrica y sujetar el filamento de níquel-cromo que trabajará en un promedio de 100 °C para el corte del poliestireno expandido y va a ser colocado entre las placas de soporte de los carros de movimiento vertical. Los resortes de tracción deben ejercer una tensión de 14,7 N a cada extremo del filamento de acuerdo a las mediciones realizadas en los resortes que emplean las empresas locales visitadas.

Se encuentra compuesto por:

- Perfil T de aluminio con perforaciones
- Resorte de tracción
- Filamento de níquel-cromo
- Dimmer regulador de corriente

1.11. Resultados del capítulo

En la Tabla 1.9 se puede observar el resumen de resultados de este capítulo.

Tabla 1.9.
Resumen de resultados del capítulo I.

Descripción	Resultado
Método de corte	Corte por hilo caliente
Estructura o bastidor	Estructura de tubería de acero
Sistema de transmisión	Polea y correa dentada
Sistema de guías	Mediante rodillos
Sistema motriz	Mediante motores de pasos

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

CAPÍTULO 2

CÁLCULO

Este capítulo presenta el desarrollo del diseño mecánico de una máquina CNC para corte de poliestireno expandido. Los principales componentes y sistemas empleados han sido revisados en el capítulo I en base a maquinaria extranjera seleccionada. Los elementos estructurales serán analizados mediante software de simulación en el cual se aplicará el método de diseño por esfuerzos permisibles (ASD por sus siglas en inglés) según el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC, por sus siglas en inglés) y el criterio de falla de Von Mises, además de la bibliografía adecuada que se mencionará en cada caso.

2.1. Diseño del sistema mecánico

Se enfocará el diseño de los aspectos relevantes de los siguientes sistemas y elementos que componen el conjunto total que se puede observar en la Figura 2.1:

- Soporte vertical- Eje Y
- Carros verticales y horizontales
- Sistema de transmisión
- Estructura o bastidor
- Sistema de corte

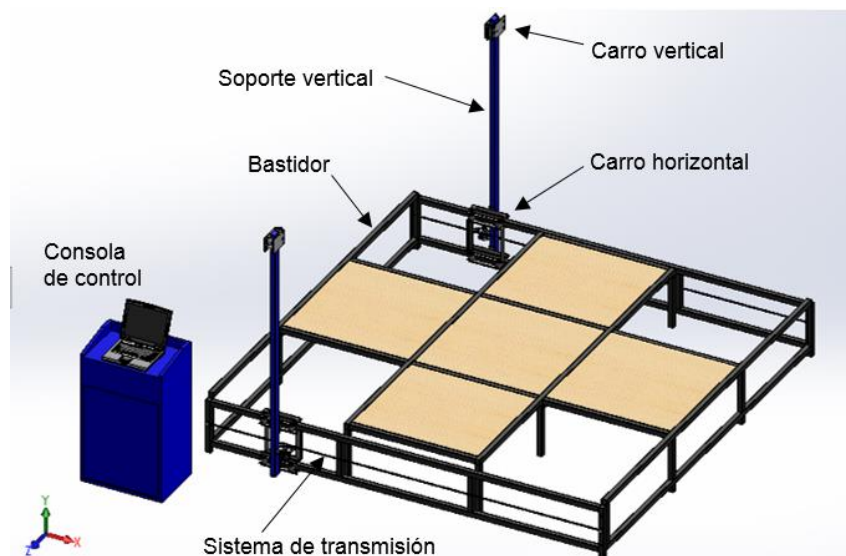


Fig. 2.1. Diseño detallado de los sistemas y componentes de la máquina. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

2.2. Soporte vertical - Eje Y

Consiste en un elemento estructural que soporta al carro vertical y la tensión del sistema de corte como se puede observar en la Figura 2.2. Se une al bastidor por medio del carro horizontal. De este componente se analizarán los siguientes aspectos:

- Diseño del soporte vertical
- Diseño de los perfiles de montaje al carro horizontal
- Diseño de las uniones soldadas y apernadas

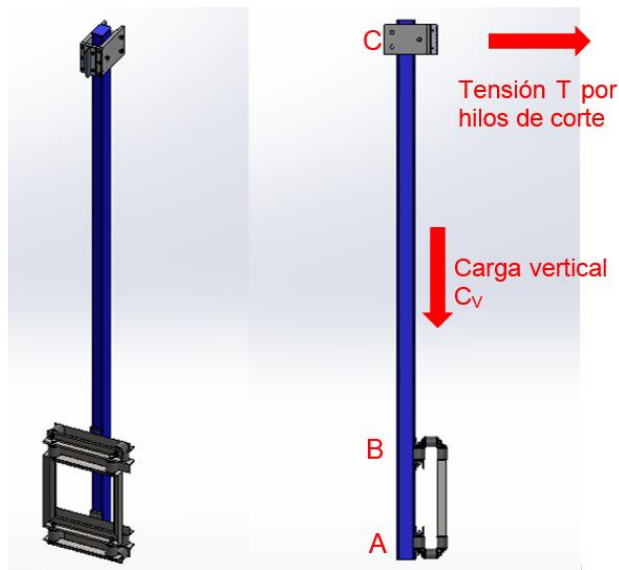


Fig. 2.2. Izquierda: Soporte vertical montado. Derecha: Cargas actuantes. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

2.2.1. Análisis del elemento estructural vertical

La carga crítica más importante corresponde a la tensión que ejercerán los resortes, en este caso tres unidades que permitan colocar hasta tres alambres de níquel-cromo para reducir tiempo de corte en ciertas aplicaciones. Esta tensión actúa en el eje z de la máquina. Los datos de cálculo son los siguientes:

- Tensión ejercida por los resortes $T=14,7 \text{ N} * 3= 44,1 \text{ N}$
- Longitud entre apoyos verticales $L_{AB}=300 \text{ mm}$
- Longitud vertical en voladizo $L_{BC}=1440 \text{ mm}$

Debido a la disposición de los apoyos y la carga se analizará este elemento como una viga en voladizo. Se muestra el diagrama de fuerzas en la Figura 2.3.

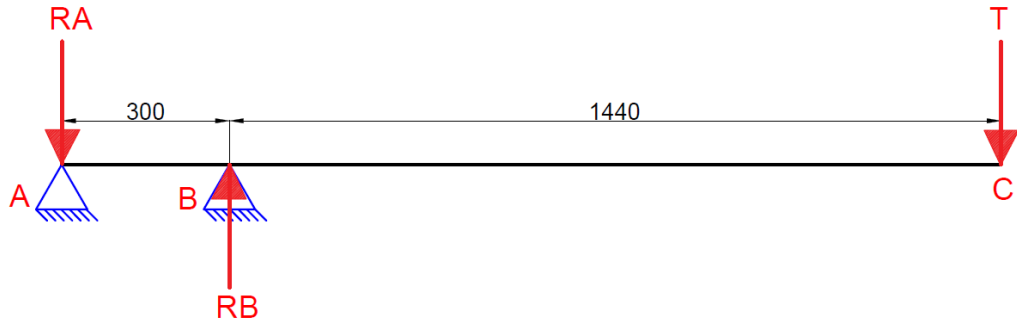


Fig. 2.3. Esquema de fuerzas en elemento vertical. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Las fórmulas a emplearse en el siguiente análisis se muestran en la Figura 2.4:

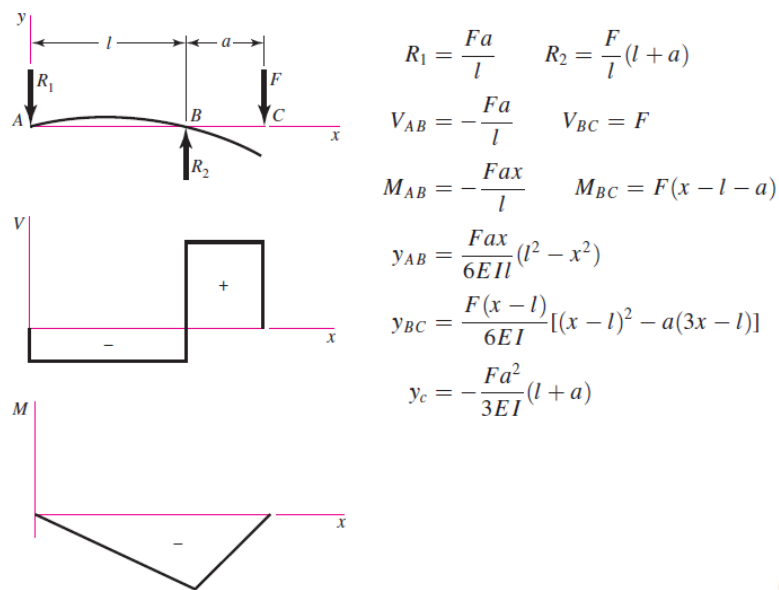


Fig. 2.4. Viga con apoyos simples y carga en voladizo. Fuente: Tabla A-9 Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág. 997 [31].

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$R_B = \frac{44,1\text{N} \cdot 1740\text{mm}}{300\text{mm}}$$

$$R_A - R_B + T = 0 \quad (1)$$

$$R_B = 255,78 \text{ N}$$

$$R_A = 211,68 \text{ N}$$

$$M_{max-v} = R_A \cdot L_{AB} \quad (2)$$

$$M_{max-v} = 211,68\text{N} \cdot 300 \text{ mm} = 63504 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Mediante la ecuación (1) se obtienen las reacciones R_A y R_B , luego mediante (2) se calcula el momento máximo en el punto B. La Figura 2.5 muestra los diagramas de

carga, corte y de momento resultantes en la viga. A partir de estos se realizará en análisis a flexión y a deflexión del elemento evaluado.

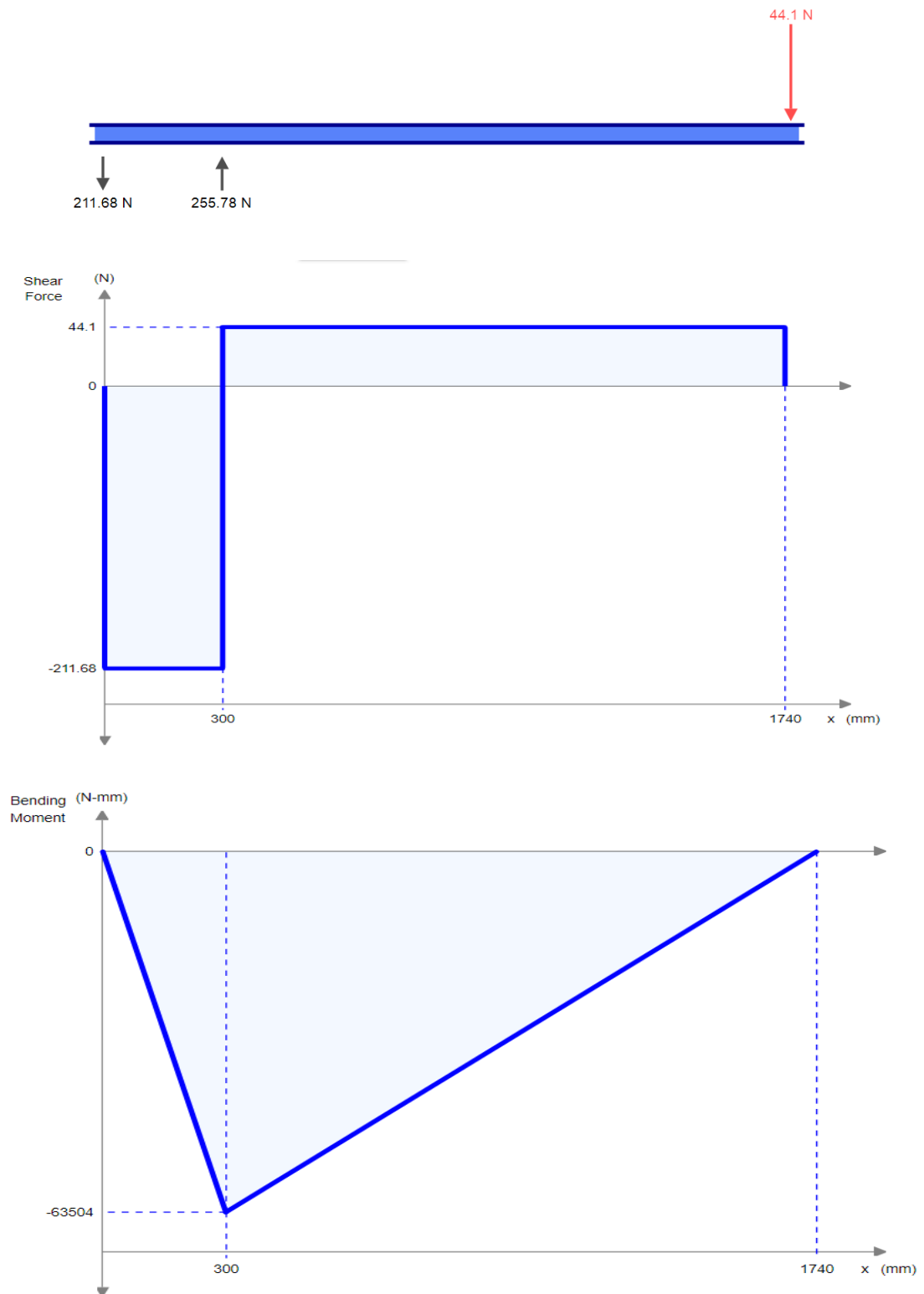


Fig. 2.5. Diagramas de carga, corte y de momento resultantes del elemento vertical. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

a. Verificación del elemento a flexión

Se empleará la ecuación (3) de máximo esfuerzo en flexión de acuerdo a Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág. 86 [31]:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max-v}}{Z} \quad (3)$$

Donde:

σ_{max}	Máximo esfuerzo en flexión	N.mm
M_{max-v}	Momento máximo vertical	MPa
Z	Módulo de sección	mm ³

Se asumirá un tubo estructural rectangular de 40*60*3 mm del proveedor Dipac [34] cuyos ejes de simetría se pueden observar en la Figura 2.6. Las especificaciones del perfil se muestran a continuación.

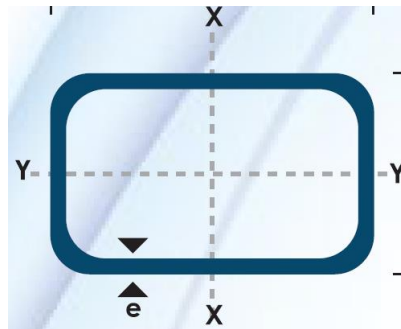


Fig. 2.6. Ejes de simetría de un perfil rectangular [34].

- Momento máximo $M_{max-v} = 63504 \text{ N.mm}$
- Módulo de sección eje Y $Z_y = 8,44 \text{ cm}^3 = 8440 \text{ mm}^3$
- Fluencia acero A500 grado A $S_y = 270 \text{ MPa}$

$$\sigma_{max} = \frac{63504 \text{ N.mm}}{8440 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{max} = 7,52 \text{ MPa}$$

El esfuerzo admisible a flexión σ_p se calcula mediante la ecuación (4) de acuerdo al Manual of Steel Construction de la AISC [35]:

$$\sigma_p = 0,66 S_y \quad (4)$$

$$\sigma_p = 0,66 * 270 \text{ MPa} = 178,2 \text{ MPa}$$

Finalmente se calcula el factor de seguridad con el que trabaja la viga mediante la ecuación (5).

$$F_S = \frac{\sigma_p}{\sigma_{max}} \quad (5)$$

$$F_S = 23,69$$

Con este valor de factor de seguridad se obtiene una resistencia alta del elemento evaluado, sin embargo es necesario el análisis a deflexión.

b. Verificación del elemento a deflexión

Se debe verificar que la máxima deflexión de la viga sea menor a la deflexión admisible.

Los datos de cálculo son los siguientes:

- Fuerza $F=T=44,1 \text{ N}$
- Longitud del tramo BC $l=1440 \text{ mm}$
- Longitud del tramo AB $a=300 \text{ mm}$
- Módulo elasticidad acero $E=207000 \text{ MPa}$
- Momento de inercia del perfil $I_y=253100 \text{ mm}^4$

De la Figura 2.4 se toma la ecuación (6) para calcular la máxima deflexión en el elemento evaluado.

$$y_c = \frac{F \cdot a^2}{3EI} (l + a) \quad (6)$$

$$y_c = \frac{44,1 \text{ N} * (1440\text{mm})^2}{3 * 207000 \text{ MPa} * 253100 \text{ mm}^4} (300 + 1440)\text{mm}$$

$$y_c = 1,01\text{mm}$$

De acuerdo con el Manual of Steel Construction [35], mediante el criterio de la deflexión permisible en el elemento evaluado se tiene la ecuación (7):

$$\delta = \frac{L}{1000} \quad (7)$$

De donde $L=L_{BC}$ es la longitud en voladizo

$$\delta = \frac{1440}{1000} = 1,44 \text{ mm}$$

$$y_c < \delta$$

De tal manera se cumple que la deflexión máxima actuante es menor que la permisible, así la viga seleccionada de 40*60*3 mm cumple el análisis de deflexión.

2.2.2. Diseño de perfiles de montaje vertical (PMV)

El soporte vertical posee cuatro soportes angulares que le permiten ser montado sobre el carro horizontal, distribuidos como se puede observar en la Figura 2.7a. Los elementos superiores de los apoyos A y B están unidos mediante soldadura al perfil vertical, mientras que los elementos inferiores se unen mediante tornillos tipo Allen.

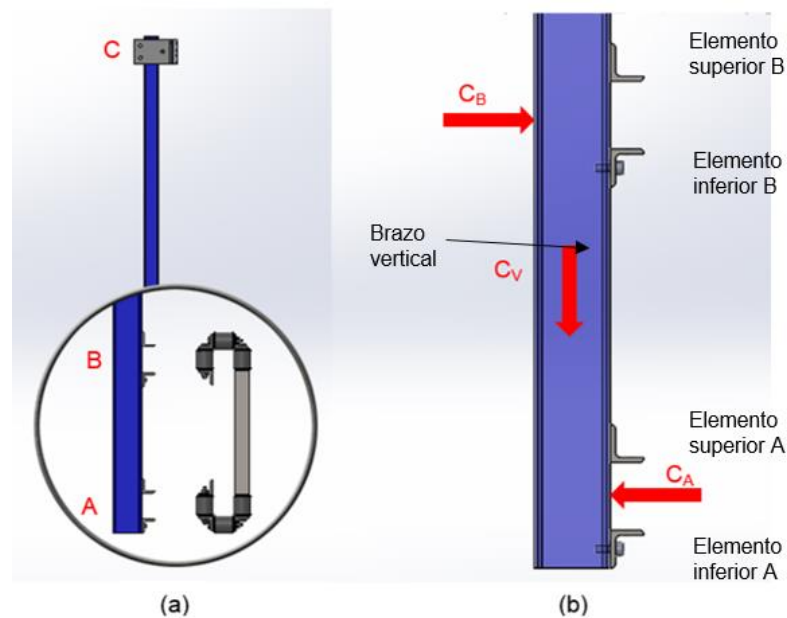


Fig. 2.7. Detalle perfiles de montaje(a). Cargas actuantes en los perfiles (b). Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Figura 2.7b se observa cómo actúan las cargas correspondientes en sentido contrario a las reacciones en A y B calculadas en la sección 2.2.1., de esta manera se tiene que:

$$C_A = R_A = 211,68 \text{ N} ; C_B = R_B = 255,78 \text{ N} ; C_V = 111,23 \text{ N}$$

El valor de C_V correspondiente a la carga vertical esta detallada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.
Carga de los componentes verticales

Componente	Masa
Perfil 40*60*3*1740mm	7,8 kg
Carro vertical	1,0 kg
Soporte de anclaje de resortes	0,2 kg
Motores de paso (2)	2,1 kg
Poleas tensoras (3)	0,05 kg
Soportes de motores	0,1 kg
Tornillería	0,1 kg
Masa total	11,35 kg
Gravedad	9,8 m/s²
Peso total	111,23 N

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Debido a la configuración del carro horizontal cuyo análisis se detalla en la sección 2.3., solamente las ruedas horizontales superiores soportan la carga vertical, que se transmite al perfil angular superior en el apoyo B, por lo tanto este será el elemento de soporte a ser evaluado. La carga lateral se divide para los dos soportes del punto B, así se tiene que:

$$C_{B/2} = \frac{255,78\text{N}}{2} = 127,89 \text{ N}$$

En la Figura 2.8a se puede observar cómo actúan las cargas en el elemento seleccionado. En la Figura 2.8b se observa la longitud del perfil. Para el análisis a realizar en el software de simulación se ha considerado los siguientes parámetros:

- Tipo de sección: Perfil angular 30*30*3 mm del proveedor Dipac [36].
- Material: Acero ASTM A36.
- Longitud entre apoyos: 40 mm.
- Carga puntual en eje Y: 127,89 N en la mitad del elemento.
- Carga puntual en eje Z: 111,23 N en la mitad del elemento.

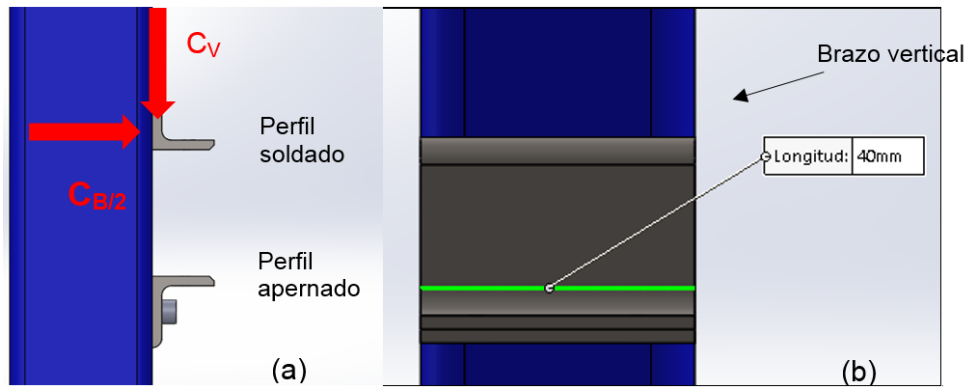


Fig. 2.8. Distribución de cargas en PMV (a). Longitud del perfil (b). Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los ejes Y-Z indicados corresponden a los que emplea el software y no están relacionados con los ejes de movimiento de la máquina.

En la Figura 2.9a se puede observar el elemento con las cargas actuantes en cada eje, mientras que en la Figura 2.9b se puede observar el perfil en vista extruida.

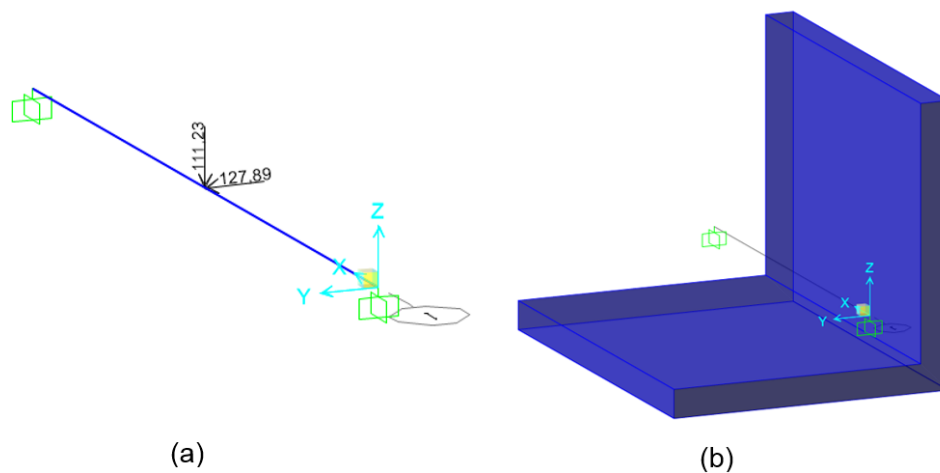


Fig. 2.9. Cargas actuantes en el perfil de montaje (a). Vista extruida (b). Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Del análisis del elemento se obtienen los siguientes resultados:

- Valor del ratio (esfuerzo actuante / resistencia del material).
- Reacciones en los apoyos.
- Diagrama de corte y momento (Valores máximos).
- Deflexión máxima.
- Esfuerzo máximo a flexión eje X-X.

Se obtiene un ratio de 0,007 como se puede observar en la Figura 2.10, lo cual muestra el bajo nivel de esfuerzo actuante al que se encuentra sometido el elemento evaluado.

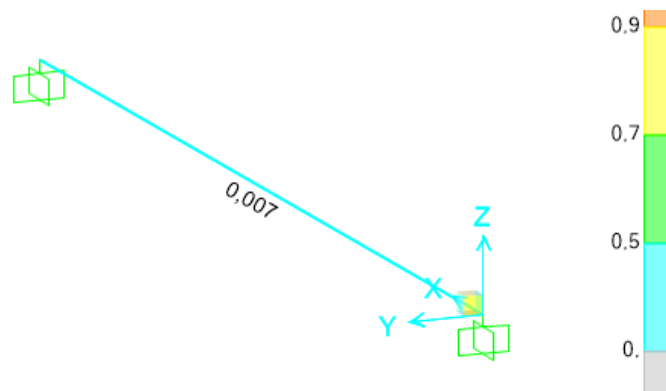


Fig. 2.10. Ratio del análisis en perfil de montaje vertical. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Figura 2.11, de arriba hacia abajo se puede observar los diagramas de carga, cortante, momento resultante, deflexión y esfuerzo máximo de tensión.

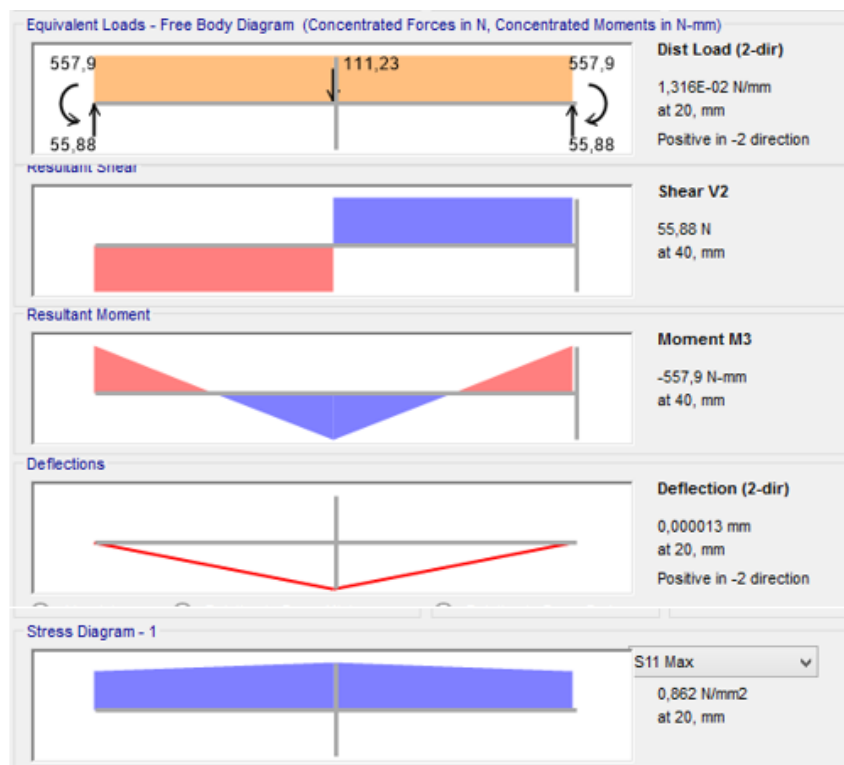


Fig. 2.11. Resultados de análisis en PMV bajo acción de carga vertical Cv. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los resultados de cada diagrama se detallan a continuación en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2.

Resultados de análisis de PMV bajo acción de carga vertical Cv

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	55.88 N	En los extremos
Cortante	Máximo	55.88 N	En los extremos
Momento resultante	Máximo	557.9 N.mm	En los extremos
Deflexión	Máximo	0.000013 mm	En $l=20$ mm
Esfuerzo a flexión	Máximo Eje X-X	0.862 MPa	En $l=20$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los resultados de los diagramas que se observan en la Figura 2.12 se detallan a continuación en la Tabla 2.3:

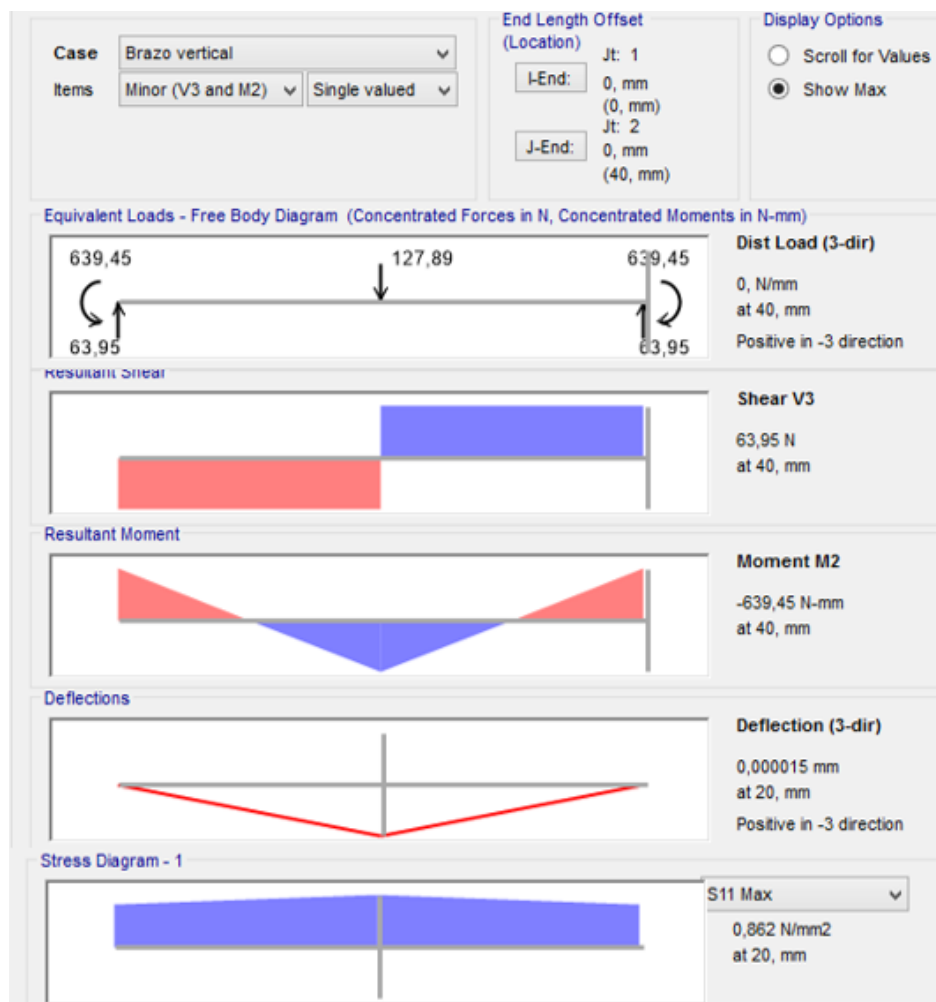


Fig. 2.12. Resultados de análisis en PMV bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.3.Resultados de análisis de PMV bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	63.95 N	En los extremos
Cortante	Máximo	63,95 N	En los extremos
Momento resultante	Máximo	639,45 N.mm	En los extremos
Deflexión	Máximo	0,000015 mm	En $l=20$ mm
Esfuerzo a flexión	Máximo Eje X-X	0,861 MPa	En $l=20,12$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Mediante la ecuación (4) para el cálculo de esfuerzo de flexión permisible se tiene lo siguiente:

- Esfuerzo permisible a flexión

$$\sigma_p = 0.66 S_y$$

$$S_y \text{ acero A36} = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = 0,66 * 250 \text{ MPa} = 165 \text{ MPa}$$

$$0,861 \text{ MPa} \ll 165 \text{ MPa}$$

- Deflexión permisible

Como se puede observar en la Tabla 2.3 la máxima deflexión en el elemento analizado es:

$$y_{max} = 0,000015 \text{ mm}$$

De acuerdo a Mott, Robert, pág. 777 [37], los límites de deflexión recomendados para partes de máquinas en general se encuentran en 0,0005 a 0,003 mm/mm, en ese sentido se tiene que:

$$y_{max \text{ perm}} = 0,0005 \text{ mm} * \frac{40 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 0,12 \text{ mm}$$

$$0,000015 \text{ mm} \ll 0,12 \text{ mm}$$

Debido a los resultados obtenidos de ratio y deflexión máxima, los cuales se encuentran por debajo de los límites permisibles se considera válido el uso del perfil angular de 30*30*3mm con una longitud de 40 mm de calidad ASTM A36.

2.2.3. Diseño de uniones en perfiles de montaje vertical (PMV)

De los cuatro perfiles de montaje, dos se unen mediante soldadura y los otros dos mediante tornillos. Además los cuatro perfiles se unen al carro horizontal por uniones apernadas.

a. Uniones soldadas al elemento vertical

La forma de la geometría a ser soldada se puede observar en la Figura 2.13 y de acuerdo a la información para uniones soldadas de Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.460 [31] esta corresponde a una junta a tope como se observa en la Figura 2.14.

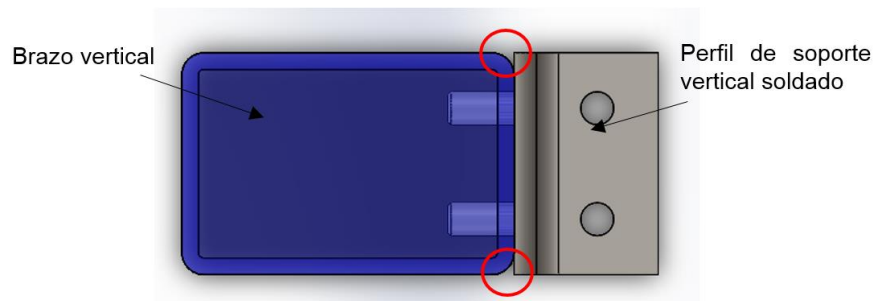


Fig. 2.13. Vista superior de los elementos de unión y ubicación de la soldadura. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

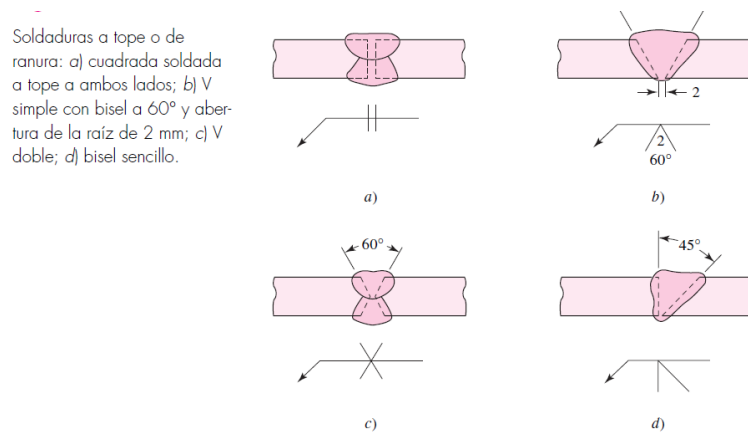


Fig. 2.14. Tipos de cordones de soldadura a tope. Fuente: Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.460 [31].

Los cordones de soldadura serán aplicados a ambos lados del perfil angular por lo que estarán bajo la acción de las cargas correspondientes a las reacciones calculadas en la sección anterior produciendo dos efectos que se detallan a continuación en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4.
Cargas aplicadas en uniones soldadas de PMV

Dirección	Valor	Tipo	Designación
-Y	55.62 N	Cortante puro	$C_{V/2}$
Z	63.95 N	Compresión	$C_{B/4}$

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Las direcciones dadas en la Tabla 2.4 corresponden a los ejes de movimiento de la máquina. Dadas las cargas se va a calcular la longitud del cordón de soldadura necesario siguiendo el procedimiento propuesto por Mott, Robert, págs. 783-787 [37], mediante análisis a corte y a compresión.

- Geometría de la unión

Como se puede observar en la Figura 2.13 se empleará soldadura a tope en los caras laterales de los elementos a unirse.

- Determinar fuerza por pulgada de soldadura

De acuerdo a la literatura indicada se muestran a continuación las ecuaciones (8) y (9) para cada caso de análisis:

- Cortante vertical directo

$$f_v = \frac{V}{A_w} \quad (8)$$

- Compresión directa

$$f_c = \frac{P}{A_w} \quad (9)$$

De donde:

V: Carga de corte $C_{V/2} = 55,62 \text{ N}$

P: Carga de compresión $C_{B/4} = 63,95 \text{ N}$

A_w : Factor geométrico $A_w = 2d$;

d: Lado del perfil $d = 30\text{mm}$ (Perfil angular)

$$A_w = 2 * 30\text{mm} = 60\text{mm}$$

$$f_v = \frac{55,62 \text{ N}}{60 \text{ mm}} = 0,927 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad f_c = \frac{63,95 \text{ N}}{60 \text{ mm}} = 1,07 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Se considera emplear soldadura por arco eléctrico con electrodo E6011 debido al bajo costo, fácil aplicación y disponibilidad de equipo. Mott, Robert, pág. 785 [37] especifica que un electrodo de tipo E60 tiene una fuerza admisible por pulgada de lado de 9600 lb/pulg.

$$9600 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}} = 1681,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

A continuación se calcula la longitud requerida de soldadura en cada caso mediante las ecuaciones (10) y (11):

- Longitud requerida con carga cortante:

$$W = \frac{0,927 \frac{\text{N}}{\text{mm}}}{1681,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \text{ por mm de lado}} \quad (10)$$

$$w = 0,00055 \text{ mm}$$

- Longitud requerida con carga de compresión:

$$W = \frac{1,07 \frac{\text{N}}{\text{mm}}}{1681,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \text{ por mm de lado}} \quad (11)$$

$$w = 0,00064 \text{ mm}$$

Los resultados de longitud de soldadura obtenidos para las cargas aplicadas son muy pequeños, sin embargo ya que el proceso de soldadura es manual se considera que la longitud mínima aplicada será de aproximadamente 15mm por lado, con un ancho máximo de cordón de 3/16 de pulgada de acuerdo a la literatura especificada.

b. Uniones apernadas al elemento vertical

En este caso se evaluará el perfil apernado en el punto de apoyo A que únicamente se encuentra sometido a tracción por la carga C_A que se divide para los dos perfiles de montaje, tal como se puede observar en la Figura 2.6, así se tiene que:

$$C_{A/2} = \frac{211,68 \text{ N}}{2} = 105,84 \text{ N}$$

Para la sujeción del perfil se ha considerado el uso de dos tornillos M4 tipo Allen de cabeza cilíndrica debido a su fácil adquisición en el mercado local y por la ubicación en el montaje, ya que si se empleara pernos de cabeza hexagonal el espacio

disponible no permitiría emplear la correspondiente herramienta de ajuste. La carga por perfil es $C_{A/2}$ y se divide nuevamente para dos que son los pernos de sujeción como se puede observar en la Figura 2.15, así se tiene que:

$$C_{A/4} = \frac{211,68 \text{ N}}{4} = 52,92 \text{ N}$$

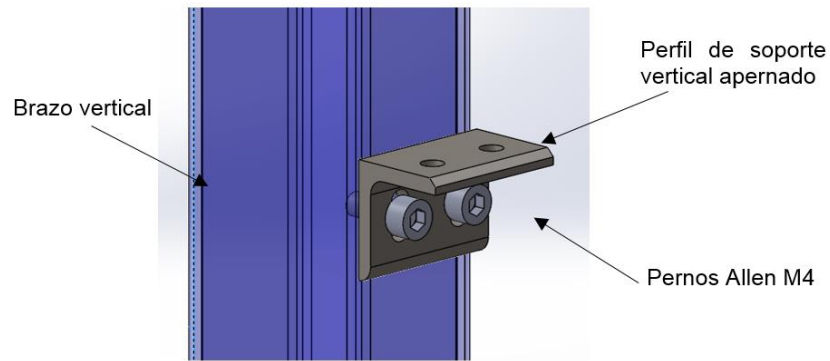


Fig. 2.15. Detalle pernos de sujeción al elemento vertical. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Las características de los tornillos Allen M4 grado 12.9 que ofrece el proveedor IBCA [38] se muestran a continuación:

- Esfuerzo cortante admisible: $\tau_{per} = 970 \text{ MPa}$
- Esfuerzo de tensión admisible $\sigma_{per} = 1080 \text{ MPa}$

Aplicando la ecuación (12) propuesto por Mott, Robert, pág. 782 [37] para diseño de juntas apernadas se tiene que:

- Área requerida del perno

$$A_t = \frac{R_t}{\sigma_{per}} \quad (12)$$

De donde:

A_t : Área requerida del tornillo

R_t : Carga total aplicada

σ_{per} : Esfuerzo de tensión admisible

$$A_t = \frac{52,92 \text{ N}}{1080 \text{ MPa}} = 0,049 \text{ mm}^2$$

- Diámetro requerido

$$D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,049 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad (13)$$

$$D = 0,25 \text{ mm} \ll 4 \text{ mm}$$

Se calculó el diámetro requerido del tornillo con la ecuación (13), así se tiene que es mucho menor que el diámetro del tornillo sugerido, por lo que se considera válida su aplicación en la unión indicada.

c. Uniones apernadas al carro horizontal

Como se puede observar en la Figura 2.16 los perfiles de montaje vertical (PMV) se ensamblan mediante uniones apernadas al carro horizontal mediante pernos Allen M4 de las mismas características que los detallados en la Figura 2.14 de la sección 2.2.3.b.

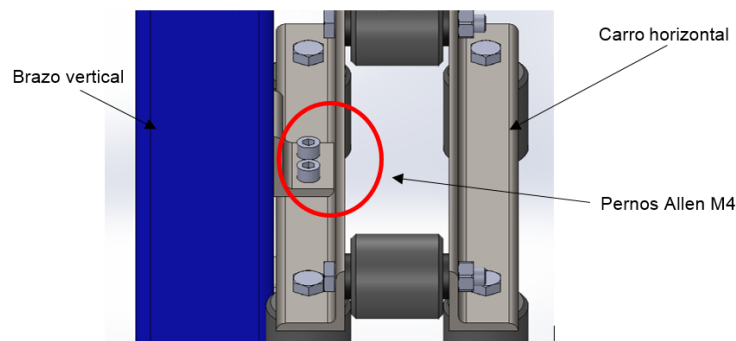


Fig. 2.16. Detalle de pernos de sujeción al carro horizontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para el análisis se considerará uno de los perfiles del punto de apoyo B en los que actúa la carga $C_{B/2}$ como se puede observar en la Figura 2.8. Como se emplean dos tornillos esta carga se divide nuevamente para dos, es decir $C_{B/4} = 63,95 \text{ N}$, valor calculado anteriormente en el análisis de las juntas soldadas.

Nuevamente se aplica el procedimiento propuesto por Mott, Robert, pág. 782 [37] para diseño de juntas apernadas se tiene que:

- Área requerida del perno

$$A_t = \frac{63,95 \text{ N}}{1080 \text{ MPa}} = 0,059 \text{ mm}^2$$

- Diámetro requerido

$$D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,059 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,27 \text{ mm} \ll 4\text{mm}$$

El diámetro calculado del perno es mucho menor que el diámetro sugerido, en ese sentido se cumple el análisis a tracción del perno y se considera válida su aplicación en la unión indicada.

2.3. Carro horizontal

Sobre este subconjunto se realiza el montaje de los componentes de movimiento vertical. Se desplaza en el eje X sobre los marcos rígidos frontal y posterior que se analizarán en la sección 2.6 correspondiente al bastidor de la máquina.

La distribución de las ruedas es la que se puede observar en la Figura 2.17, de manera que los rodamientos alojados en las ruedas soporten únicamente cargas radiales.

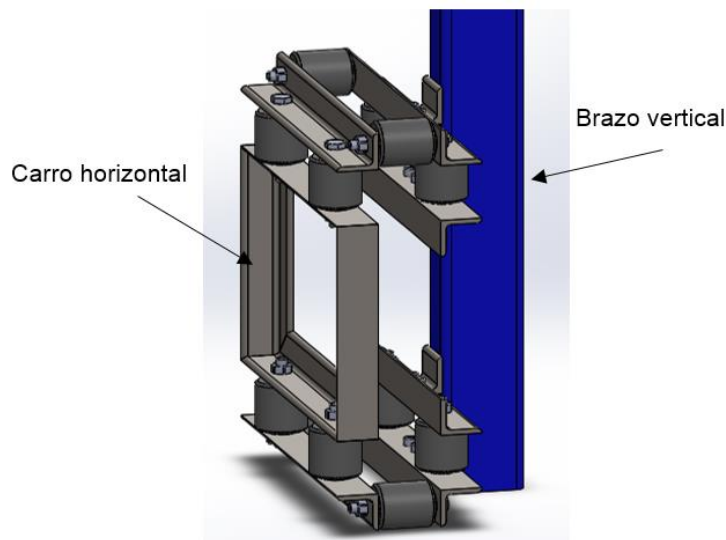


Fig. 2.17. Distribución de ruedas en el carro horizontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Se realizará el diseño y selección de los siguientes componentes:

- Perfiles angulares de soporte
- Pernos de sujeción
- Rodamientos radiales.

2.3.1. Análisis de perfil angular horizontal (PAH)

Los perfiles angulares preseleccionados son de 30*30*3 mm disponibles en el mercado local en calidad ASTM A36 de acuerdo al proveedor Dipac. Los perfiles permiten colocar adecuadamente las perforaciones para pernos M8 que sirven de eje a las ruedas y que más adelante se justificará su selección.

Los perfiles angulares que están sometidos a mayor carga son los del patín superior como se puede observar en la Figura 2.18, en los que actúa la carga C_B determinada en la sección 2.2.2., de la misma forma la carga vertical que actúa sobre estos perfiles se encuentra detallada en la Tabla 2.1 de la misma sección.

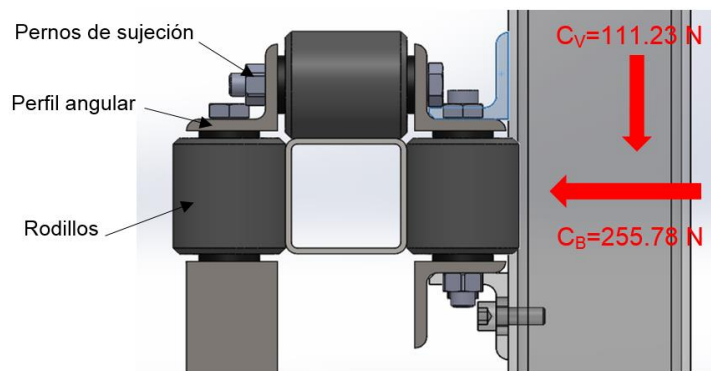


Fig. 2.18. Cargas que actúan en el patín superior del carro horizontal. Vista lateral. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Figura 2.19 se puede observar la distancia entre apoyos que tiene el elemento a evaluar.

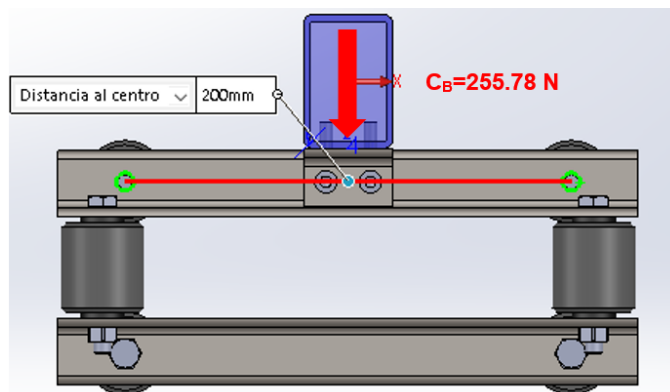


Fig. 2.19. Cargas que actúan en el patín superior del carro horizontal. Vista superior. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La carga C_V actúa directamente sobre el elemento, mientras que la carga C_B se divide para dos que son los perfiles sometidos directamente a esa carga.

Para el análisis se consideran los siguientes parámetros:

- Material: Acero ASTM A36.
- Tipo de sección: Perfil angular de 30*30*3 mm.
- Longitud entre apoyos: 200 mm.
- Carga puntual en eje Y: $C_{B/2} = 255,78\text{N}/2 = 127,89\text{ N}$ en la mitad del elemento.
- Carga puntual en eje Z: $C_v = 111,23\text{ N}$ en la mitad del elemento.

En la Figura 2.20a se puede observar el elemento con las cargas actuantes en cada eje, mientras que en la Figura 2.20b se puede observar el perfil en vista extruida

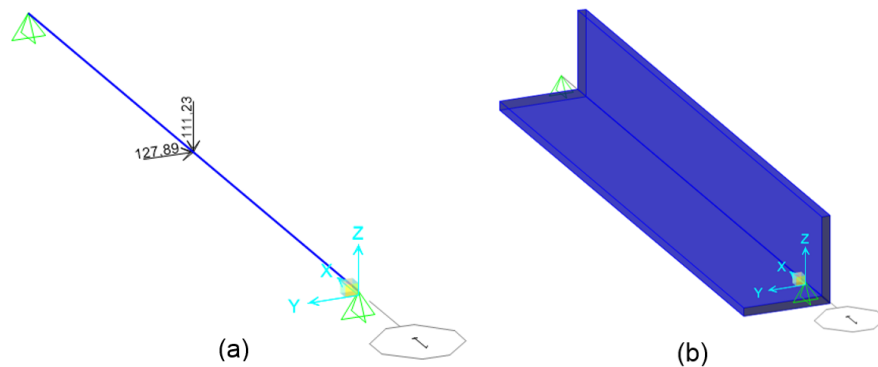


Fig. 2.20. Cargas actuantes en el perfil angular horizontal (a). Vista extruida (b). Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

.Después del análisis del elemento se obtienen los siguientes resultados:

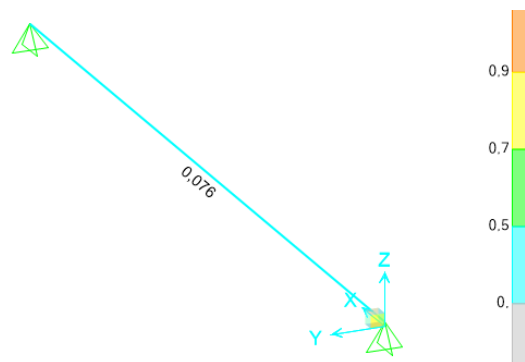


Fig. 2.21. Ratio del análisis en perfil angular horizontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Se obtiene un ratio de 0.076 como se puede observar en la Figura 2.21, lo cual muestra el bajo nivel de esfuerzo actuante al que se encuentra sometido el elemento

evaluado. Los resultados de los diagramas que se observan en la Figura 2.22 se detallan a continuación en la Tabla 2.5.

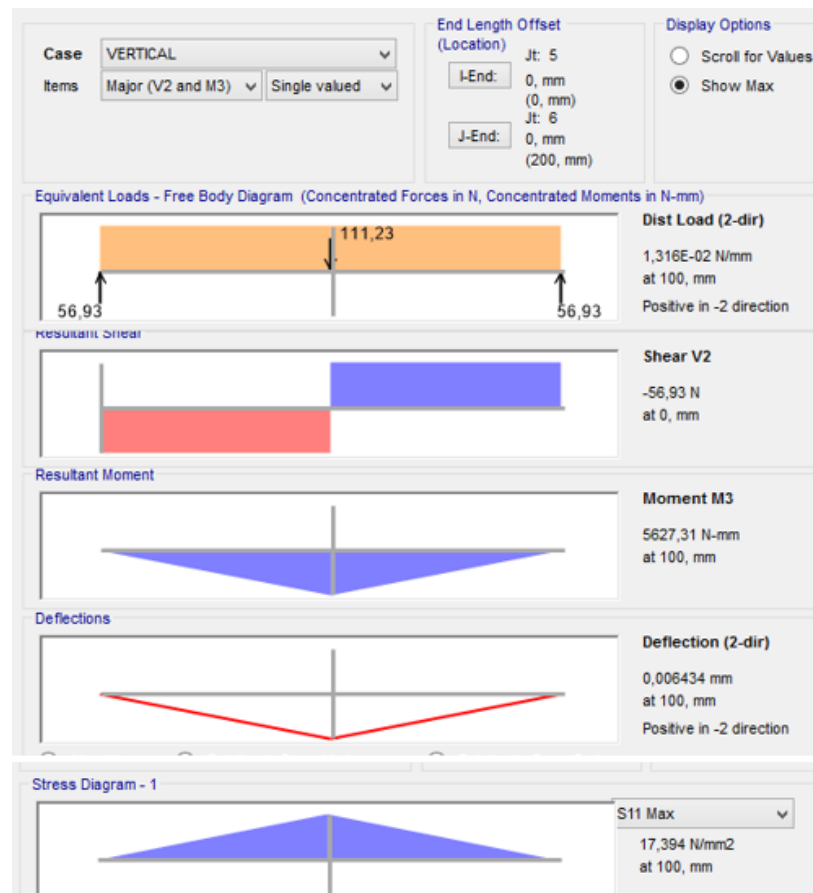


Fig. 2.22. Resultados de análisis en PAH bajo acción de carga vertical C_v . Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.5.
Resultados de análisis de PAH bajo acción de carga vertical C_v

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	56,93 N	En los extremos
Cortante	Máximo	56,93 N	En los extremos
Momento resultante	Máximo	5627,31 N.mm	En $l=100$ mm
Deflexión	Máximo	0,006434 mm	En $l=100$ mm
Esfuerzo a flexión	Máximo Eje X-X	17,394 MPa	En $l=100$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los resultados de los diagramas que se observan en la Figura 2.23 se detallan en la Tabla 2.6.

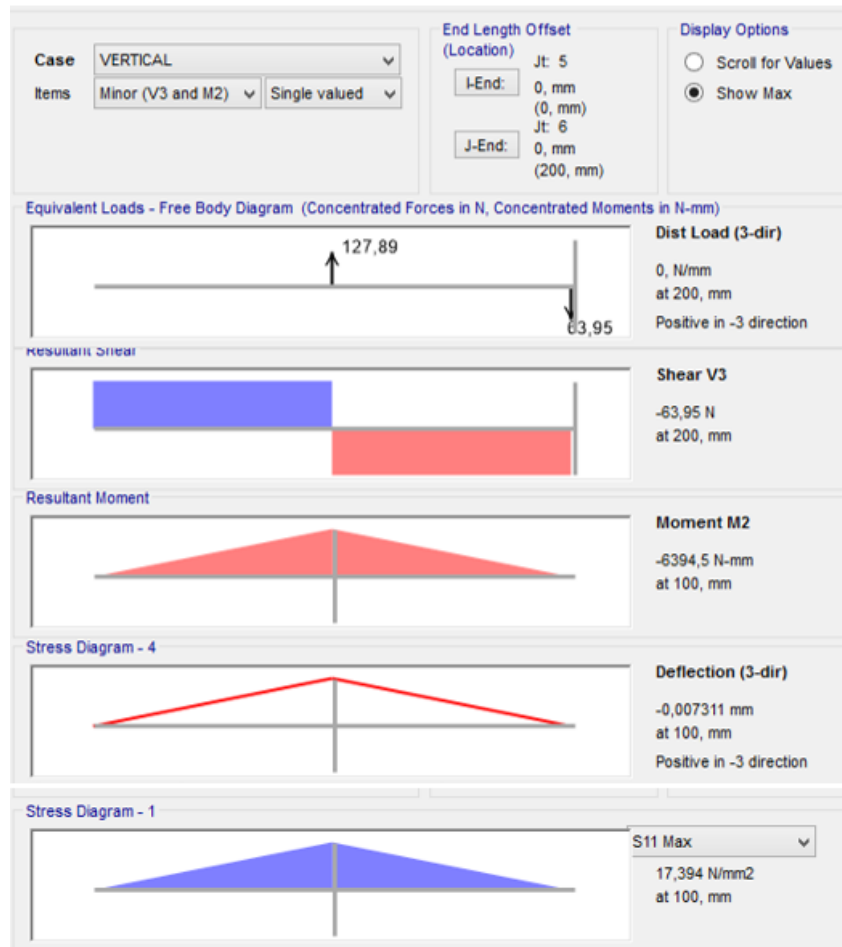


Fig. 2.23. Resultados de análisis en PAH bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.6.
Resultados de análisis de PAH bajo acción de carga horizontal $C_{B/2}$

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	63.95 N	En los extremos
Cortante	Máximo	63.95 N	En los extremos
Momento resultante	Máximo	6394.5 N.mm	En $l=100$ mm
Deflexión	Máximo	0.007311 mm	En $l=100$ mm
Esfuerzo a flexión	Máximo Eje X-X	17.394 MPa	En $l=100$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los valores permisibles de esfuerzo de flexión y deflexión obtenidos son los que se muestran a continuación:

- Esfuerzo permisible a flexión

$$\sigma_p = 0,66 S_y$$

$$S_y \text{ acero A36} = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = 0,66 * 250 \text{ MPa} = 165 \text{ MPa}$$

$$17,394 \text{ MPa} < 165 \text{ MPa}$$

- Deflexión permisible

$$y_{\max \text{ perm}} = 0,0005 \text{ mm} * \frac{260 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 0,13 \text{ mm}$$

$$0,007311 \text{ mmm} < 0,12 \text{ mm}$$

Debido a los resultados obtenidos de ratio y deflexión máxima para las cargas vertical y horizontal, los cuales se encuentran por debajo de los límites permisibles se considera válido el uso del perfil angular de 30*30*3mm de calidad ASTM A36.

2.3.2. Verificación de pernos de sujeción

Los pernos seleccionados son del tipo M8 grado 8.8 de 65mm cuya longitud permite realizar la sujeción de dos soportes angulares, rueda y dos arandelas planas como se puede observar en la Figura 2.24.

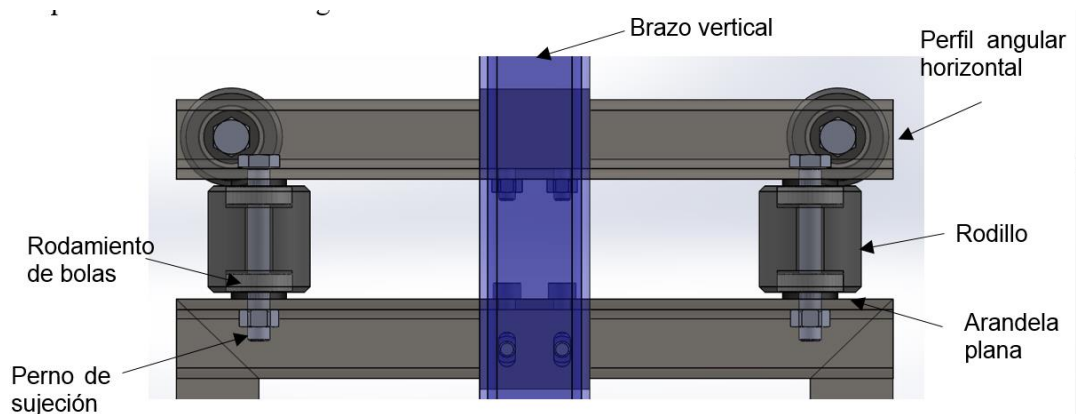


Fig. 2.24. Detalle de sujeción con pernos M8. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La selección se debe a que los rodamientos radiales más pequeños disponibles en el mercado local poseen un diámetro interior de 8mm de acuerdo a diferentes proveedores consultados. Por la forma de aplicación de las cargas los pernos se encuentran sometidos a cortante puro como se puede observar en la Figura 2.25.

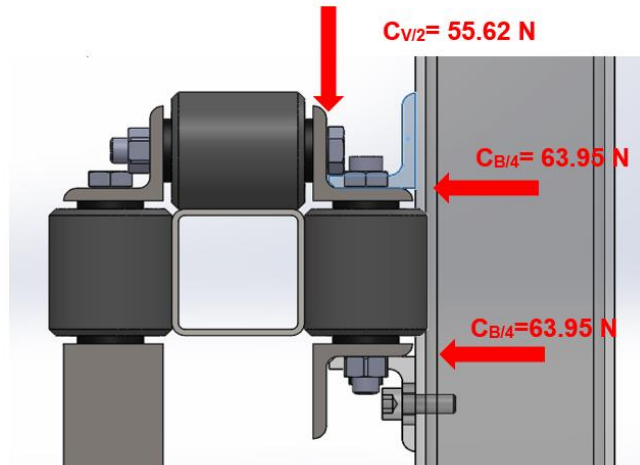


Fig. 2.25. Cargas cortantes actuando en los pernos de sujeción. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

De esta manera en cada uno de los pernos horizontales actúa la carga $C_{V/2}$ y el cada perno vertical actúa una doble cortante $C_{B/4}$.

Para el análisis del elemento se seguirá el procedimiento propuesto por Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, págs. 435-439 [31] con las especificaciones que se muestran a continuación:

S_y	Fluencia perfil angular ASTM A36 [39]	250 MPa
n_d	Factor de diseño	2
t	Espesor del perfil angular	3 mm
d	Diámetro perno	8 mm
S_p	Resistencia mínima de prueba perno	600 MPa

Se ha considerado pernos M8 de grado 8.8 que se encuentra fácilmente en el mercado local. El valor de esfuerzo cortante admisible fue tomado de Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág. 420 [31].

a. Número y colocación de pernos

En el sentido de las cargas cortantes de mayor magnitud $C_{B/4} = 63,95 \text{ N}$ se encuentran colocados dos pernos como se puede observar en la Figura 2.25.

b. Aplastamiento de los elementos, todos los pernos activos

Aplicando la ecuación (14) se obtiene el límite de carga en las paredes del perfil angular.

$$\sigma = \frac{F}{2td} = \frac{S_y}{n_d}$$
$$F = \frac{2td * S_y}{n_d} \quad (14)$$

$$F = \frac{2 * 3\text{mm} * 8\text{mm} * 250\text{MPa}}{2} = 6000 \text{ N}$$

c. Cortante del perno, todos los pernos activos

Se empleará la ecuación (15) de acuerdo con la literatura de Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.439 [31].

$$\tau = \frac{F}{4\pi d^2 / 4} = 0,577 \frac{S_p}{n_d}$$
$$F = 0,577\pi d^2 \frac{S_p}{n_d} \quad (15)$$

$$F = 0,577\pi(8\text{mm})^2 \frac{600\text{MPa}}{2} \text{ kN}$$

$$F = 34,8 \text{ kN} \gg C_{B/4} = 63,95 \text{ N}$$

En este sentido se cumple que el valor limitante para la cortante en el perno es mucho mayor que la carga de corte aplicada, mientras que en las paredes del perfil angular el límite de carga es de 6000 N. Por lo tanto se cumple el análisis a corte y aplastamiento de los elementos evaluados.

2.3.3. Comprobación de rodamientos lineales

Mediante una revisión previa del catálogo de rodamientos SKF [40] se pudo identificar que para las cargas existentes se requiere rodamientos rígidos de bolas de pequeño tamaño. En el mercado local el rodamiento rígido de bolas más pequeño disponible tiene unas dimensiones de 8mm de diámetro interno, 24mm de diámetro externo y 8mm de espesor.

Los criterios más importantes a considerarse para la selección son los que se muestran a continuación:

- Capacidad de carga
- Vida útil
- Lubricación y sellado

a. Verificación de la capacidad de carga

De acuerdo al catálogo SKF pág.348 [40] un rodamiento con las dimensiones especificadas y con las caras laterales selladas posee la designación 628-2RZ, cuyas características son las siguientes:

- Capacidad de carga estática C_0 : 1,66 kN
- Capacidad de carga dinámica C : 3,9 kN
- Velocidad límite: 32000 rpm
- Masa: 0,017 kg
- Carga límite de fatiga 0,057 kN

En el literal c de la sección 2.5.1 se determinará una velocidad de giro del motor de pasos de aproximadamente 10 rpm. De esta manera al ser las ruedas de mayor diámetro que el piñón motriz su velocidad será menor a 10 rpm y de acuerdo el catálogo SKF pág.64 [40] establece que la carga actuante se debe considerar como estática. En la Figura 2.26 se puede observar que para cada sentido de carga se dispone de cuatro rodamientos sobre los que actúa dicha carga.

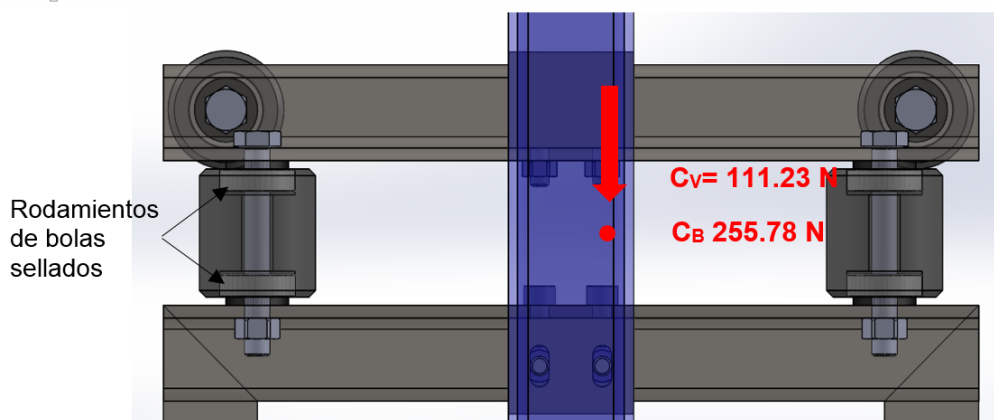


Fig. 2.26. Detalle de rodamientos en sentido de las cargas aplicadas. C_B perpendicular a C_V . Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Considerando la carga C_B de mayor valor se tiene que la fuerza radial por rodamiento es:

$$F_r = \frac{255,78\text{N}}{4} = 63,95\text{N}$$

$$1,66 \text{ kN} \gg 63,95 \text{ N}$$

El valor obtenido es muy inferior a la capacidad de carga estática del rodamiento seleccionado, en ese sentido se cumple la capacidad de carga requerida.

- Verificación de la vida útil del rodamiento y del lubricante

El rodamiento seleccionado 628-2RZ va a trabajar a una carga estática constante de 63,95 N y 10 rpm. En este caso se empleará la herramienta online SKF Bearing Calculator [41] que ofrece el fabricante.

En las Figura 2.27 y 2.28 se pueden observar el tipo de rodamiento y las características respectivamente.



Fig. 2.27. Selección de rodamiento 628-2RZ. Fuente: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>

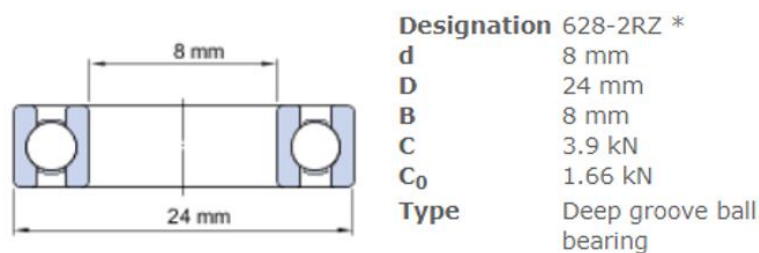


Fig. 2.28. Características de rodamiento de bolas 628-2RZ. Fuente: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>

En la Figura 2.29 se puede observar la selección de cálculos de vida del rodamiento y vida útil de la grasa para rodamientos de bolas sellados. En la Figura 2.30 se pueden observar los datos ingresados para el cálculo. Cabe destacar que se consideraron condiciones recomendadas de alta limpieza y grasa usada en el rodamiento tipo LHT23 marcada como estándar

Select calculation

Select All

- Bearing life**
- Grease life for capped deep groove ball bearings**

Fig. 2.29. Selección de opciones de cálculo. Fuente: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>

Bearing life, Grease life for capped deep groove ball bearings

Select bearing internal radial clearance Select from list

F_r Radial load kN

F_a Axial load kN

n_i Rotational speed of the inner ring r/min

Operating temperature °C
Bearing outer ring

η_c specification method Select from list

Lubricant type and cleanliness Select from list

Grease used in the bearing Select from list

Fig. 2.30. Entrada de los parámetros de funcionamiento. Fuente: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>

En la Figura 2.31 se puede observar los resultados que entrega la calculadora, sin embargo advierte que debido a las muy bajas rpm no se puede obtener los valores de vida útil.

L_{10mh} SKF rating life	<input type="text" value="hour"/>
L_{10h} Basic rating life	<input type="text" value="hour"/>
L_{10} Capped bearing grease life	<input type="text" value="hour"/>
C/P Load ratio	<input type="text" value=""/>
L_{10} Capped bearing grease life	<input type="text" value="hour"/>

Fig. 2.31. Resultados obtenidos de análisis de rodamiento. Fuente: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>

Por lo tanto, se considera emplear los valores orientativos de acuerdo al tipo de maquinaria que se encuentra en el catálogo SKF pág.83 [40] como se puede observar en la Figura 2.32.

Valores orientativos de la vida útil especificada de los diferentes tipos de máquinas	
Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000

Fig. 2.32. Valores orientativos de vida útil especificada para diferentes tipos de máquinas. Fuente: SKF pág.83 [40]

Se elige la opción de máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo con un rango de horas de funcionamiento entre 10000 a 25000. Se considera que el trabajo de los rodamientos del carro horizontal es inferior al realizado por los otros ejemplos indicados en la Figura 2.32, en ese sentido las horas de funcionamiento pueden ubicarse cerca del rango mayor de 25000.

2.4. Carro vertical

Se desplaza a lo largo del soporte vertical y permite el montaje de parte del sistema de corte. Se emplean los mismos componentes de rodamientos y pernos del carro horizontal en diferente distribución como se muestra en la Figura 2.33. La carga actuante corresponde a la tensión $T=44,1N$ analizada en la sección 2.2.1., al ser mucho menor que la carga aplicada en el carro horizontal se considera que el uso de los mismos componentes cumplen con los requerimientos.

Para las placas laterales de soporte se consideró el uso de acero ASTM A36 de 2 mm de espesor que es de fácil adquisición en el mercado local. Con un límite de fluencia de 250 MPa y aplicando la ecuación (14) para el aplastamiento se tiene que:

$$F = \frac{2 * 2\text{mm} * 8\text{mm} * 250\text{MPa}}{2} = 4000 N$$

El valor obtenido de límite de carga es mucho mayor que la tensión aplicada por lo que este material puede satisfacer los requerimientos especificados.

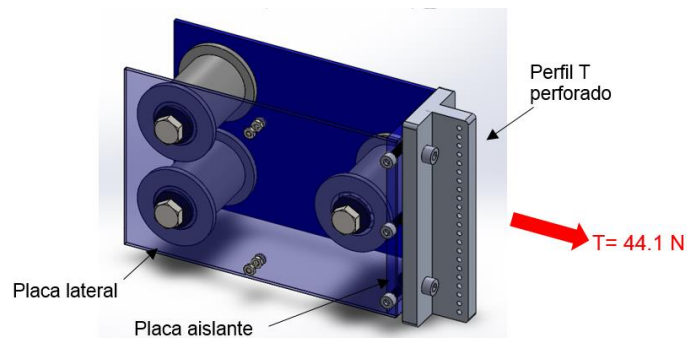


Fig. 2.33. Detalle carro vertical. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

2.5. Sistema de transmisión

Su función es convertir el movimiento giratorio del motor de pasos en movimiento lineal vertical y horizontal. Se compone de los siguientes elementos:

- Motor de pasos.
- Banda sincrónica dentada.
- Poleas tensoras de banda

2.5.1. Cálculo y selección de motores de pasos

El cálculo y selección de los motores de pasos se realizará en base al manual de Automation Direct Sistema de motores paso a paso Sure Step págs. A-2, A-19 [42]. El manual sugiere el siguiente procedimiento:

a. Definir datos de movimiento y del actuador

Los datos de movimiento y del actuador mostrados en la Tabla 2.7 han sido obtenidos tomando como base la maquinaria extranjera analizada, proveedores locales de partes y accesorios y el criterio de trabajo brindado por las empresas consultadas.

Las superficies en contacto corresponden a las ruedas del carro horizontal fabricadas de poliamida PA grado 6 que es de fácil adquisición y mecanización las cuales se deslizan sobre tubos cuadrados de acero, en este caso se tiene un coeficiente de fricción de 0.41 [43].

Tabla 2.7.
Datos de movimiento y del actuador

Parámetro	Valor	Observaciones
Peso del objeto	155.13 N	Ver detalle en tabla XIII.
Fuerza externa	20 N	Aprox. 2 kgf
Coefficiente de fricción de superficies en contacto	0.41	Polímero-Acero
Angulo de desplazamiento	0°	
Eficiencia de la correa y polea motriz	0.8	
Dimensiones polea motriz	Ø23.87mm*18mm	
Material de la polea motriz	Acero SAE1018	
Numero de dientes de la polea motriz	15	
Dimensiones poleas tensoras (2)	Ø30mm*18mm	
Resolución deseada	0.3mm/paso	
Reducción de velocidad	1:1	
Distancia de movimiento	2600 mm	En eje X
Tiempo de movimiento	208 seg	
Tiempo aceleración y desaceleración	1 seg	
Velocidad máxima	750 mm/min	
Avance por paso de los motores	1.8°	
Pasos por revolución	200	
Frecuencia inicial	20 Hz	
Desplazamiento de la carga por rotación del eje motor	$2\pi r = 75 \text{ mm/rev}$	

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 2.7 se ha detallado las características que se debe conocer para el cálculo y selección de los motores de pasos que actuarán para realizar el movimiento en el eje X de la máquina ya que es en el que se desplaza la mayor carga móvil. Debido a esto a la carga vertical anteriormente empleada se ha agregado el peso del carro

horizontal como se puede observar en la Tabla 2.8 para obtener la totalidad de carga que van a mover los motores de pasos.

Tabla 2.8.
Carga vertical total

Componente	Masa
Perfiles angulares carro horizontal	3.48 kg
Pernos M8	0.5 kg
Ruedas y rodamientos	0.5 kg
Masa total 2	4.48 kg
Gravedad	9.8 m/s ²
Peso total 2	43.9 N
Carga C_v	111.23 N
Carga total C_{vT}	155.13 N

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

b. Determinar la resolución de posición de carga

Se hace uso de varias fórmulas propuestas por el manual, para lo cual la Tabla 2.9 muestra las definiciones de varios términos que se van a emplear.

Tabla 2.9.
Definiciones para cálculo de motor de pasos

Términos	Definiciones
d_{carga}	Distancia que se mueve la carga por rotación del eje del motor ($P=\text{paso}=1/ d_{\text{CARGA}}$)
D_{total}	Distancia total del movimiento
L_{θ}	Resolución de posición
θ_{paso}	Resolución del paso (pasos/rev _{motor})
i	Relación de reducción del reductor (rev _{motor} / rev _{reductor})
T_{acel}	Torque necesario para acelerar y desacelerar la inercia total del sistema
T_{resist}	Torque necesario para mover el mecanismo
f_0	Frecuencia inicial
P_{total}	Pulsos totales

Fuente: Automation Direct, Sistema de motores paso a paso Sure Step pág. A-13 [42].

- Resolución de pasos

Por defecto este valor en los motores de pasos previstos a adquirir es:

$$\theta_{paso} = 200 \frac{pasos}{rev}$$

Este valor resulta de dividir 360° que tiene una revolución para 1.8° que avanzan los motores por cada paso o pulso.

- Cálculo de resolución de posición

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (16).

$$L_\theta = \frac{\frac{d_{carga}}{i}}{\theta_{paso}} \quad (16)$$

$$L_\theta = \frac{\frac{75 \frac{mm}{rev}}{1}}{200 \frac{pasos}{rev}} = 0,375 \frac{mm}{paso}$$

c. Determinar el perfil de movimiento

- Cálculo de pulsos totales

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (17).

$$P_{total} = \left(\frac{D_{total}}{d_{carga}} \right) * \theta_{paso} \quad (17)$$

$$P_{total} = \left(\frac{2600mm}{\frac{75 \frac{mm}{rev}}{1}} \right) * 200 \frac{pasos}{rev}$$

$$P_{total} = 6933,33 \text{ pasos}$$

- Frecuencia máxima para movimiento trapezoidal

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (18).

$$f_{trapezoidal} = \frac{P_{total} - (f_0 * t_{acel})}{t_{total} - t_{acel}} \quad (18)$$

$$f_{trapezoidal} = \frac{6933,33 \text{ pasos} - (20 \text{ Hz} * 1 \text{ s})}{200 \text{ s} - 1 \text{ s}} = 33.74 \text{ Hz}$$

- Velocidad máxima requerida del motor

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (19).

$$n_{max} = \frac{f_{trapezoidal} * \frac{60 s}{1 min}}{\theta_{paso}} \quad (19)$$

$$n_{max} = \frac{33.74 Hz * \frac{60 s}{1 min}}{200 \frac{pasos}{rev}} = 10,42 RPM$$

d. Determinar torque necesario para mover la carga

En la Figura 2.34 se puede observar la variación del torque en función de la aceleración y velocidad de funcionamiento del motor.

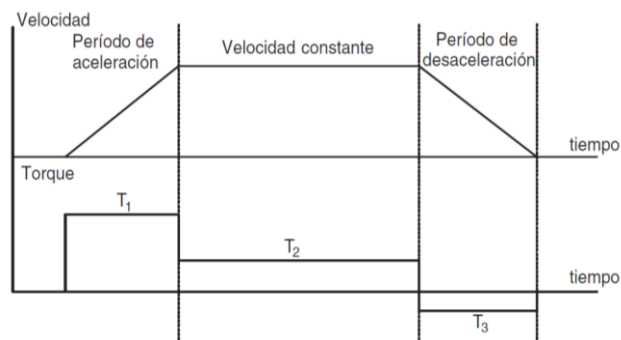


Fig. 2.34. Perfil trapezoidal de movimiento. Fuente: Automation Direct [42].

- Cálculo de la inercia total

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (20).

$$J_{total} = J_{motor} + \left(\frac{J_{poleas} + J_{carga}}{i^2} \right) \quad (20)$$

Donde J representa la inercia medida en $kg \cdot m^2$. En el desarrollo de los cálculos no se incluye la inercia del motor hasta llegar a un resultado preliminar y realizar la verificación. Mediante la ecuación (21) se calculará la inercia de la polea motriz.

$$J_{polea\ motriz} = \pi * L_p * \rho * r^4 \quad (21)$$

Donde:

- L_p : Ancho de la polea motriz L_{pm} y tensora L_{pt}
- r : Radio de polea motriz r_{pm} o tensora r_{pt}
- ρ_{ac} : Densidad del acero ($7850 kg/m^3$)
- ρ_{al} : Densidad del aluminio ($2700 kg/m^3$)

$$J_{polea\ motriz} = \pi * 0,020m * 7850 \frac{kg}{m^3} * (0,01194m)^4$$

$$J_{polea\ motriz} = 0.00001\ kg.m^2$$

$$J_{poleas\ tensora} = \left(\pi * 0,018m * 2700 \frac{kg}{m^3} * (0,015m)^4 \right) * 2$$

$$J_{poleas\ tensora} = 0,000015\ kg.m^2$$

$$J_{carga} = Peso * r_{pm}^2 \quad (22)$$

$$J_{carga} = 15,83\ kg * (0,01194m)^2 = 0,002257\ kg.m^2$$

A continuación se calcula la inercia de la carga y poleas reflejada al motor mediante la ecuación (23).

$$J_{reflejada} = \frac{J_{poleas} + J_{carga}}{i^2} \quad (23)$$

$$J_{reflejada} = \frac{(0,00001 + 0,000015 + 0,002257)kg.m^2}{1^2}$$

$$J_{reflejada} = 0.002282\ kg.m^2$$

- Torque necesario para acelerar la inercia

Mediante las ecuaciones (24) y (25) se calcula los torques de aceleración y para mover la carga respectivamente.

$$T_{acel} \approx \frac{J_{total} * \frac{\Delta velocidad}{\Delta tiempo} * 2\pi}{60} \quad (24)$$

$$T_{acel} \approx \frac{0,002282\ kg.m^2 * 10,42\ RPM * 2\pi}{60}$$

$$T_{acel} \approx 0,00249\ N.m$$

- Torque para mover la carga

$$T_{resist} = \frac{F_{total} * r_{pm}}{i} \quad (25)$$

$$F_{total} = F_{externa} + F_{fricción} + F_{gravedad}$$

$$F_{total} = 20\ N + 0,41 * 155,13\ N + 155,13\ N = 238,733N$$

Luego:

$$T_{resist} = \frac{238,733 * 0,01194m}{1} = 2,85 \text{ N.m}$$

El torque requerido en el motor se obtiene mediante la ecuación (26):

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} \quad (26)$$

$$T_{motor} = (0,00249 + 2,85) \text{ N.m}$$

$$T_{motor} = 2,8525 \text{ N.m}$$

De acuerdo con un proveedor local, el motor más adecuado es un NEMA 23 que cumple con las siguientes especificaciones:

- Torque máximo: 3,0 N.m
- Corriente nominal: 3 A/fase
- Tensión de alimentación: 36 VDC
- Potencia: 90 Watts

2.5.2. Cálculo y selección de la banda sincrónica dentada

La selección de la banda se hará siguiendo el procedimiento del catálogo de correas Megalinear [22] del fabricante Megadyne. En la Figura 2.35 se puede observar las simbologías y definiciones empleadas en los cálculos para la banda dentada.

Symbol	Unit	Definition	Symbol	Unit	Definition
a	m/s ²	acceleration	g	m/s ²	gravity (9,81)
b	mm	belt width	μ	–	friction coefficient
C	–	safety factor	m	Kg	conveyed mass
Δl/lo	‰	elongation	M_t	Nm	drive torque
d	mm	idler pitch diameters	n_i	1/min	revs/min (RPM) of drive sprocket 1
d_i	mm	sprocket pitch diameter	P	KW	drive power
F_p	N	pretension	Q	N	force exerted by mass (m)
F_u	N	peripheral force	V	m/s	belt speed
F_{p spec}	N/cm	transmittable force per tooth per unit width	Z_i		number of teeth of sprocket
MTL	N	max traction load	Z_m		number of teeth in mesh on driver sprocket (12)
BS	N	breaking strength	Z_L		number of teeth of large pulley
c	mm	centre distance	Z_s		number of teeth of small pulley
			p		belt pitch

Fig. 2.35. Simbología y definiciones catálogo Megalinear. Fuente: Megalinear pág.6 [22].

En las Figuras 2.36 y 2.37 se pueden observar las fórmulas más empleadas en el cálculo y selección de una banda dentada y el diagrama de fuerzas de una transmisión tipo omega que se empleará para el movimiento horizontal.

USEFUL FORMULAE AND CONVERSION FACTORS

$$V = \frac{d_1 \cdot n_1}{19100} \quad n_1 = \frac{V \cdot 19100}{d_1} \quad d_1 = \frac{V \cdot 19100}{n_1} \quad Q = m \cdot g$$

$$P = \frac{M_t \cdot n_1}{9550} \quad M_t = \frac{9550 \cdot P}{n_1} \quad M_t = \frac{F_u \cdot d_1}{2000}$$

Fig. 2.36. Fórmulas de cálculo catálogo Megalinear. Fuente: Megalinear pág.6 [22].

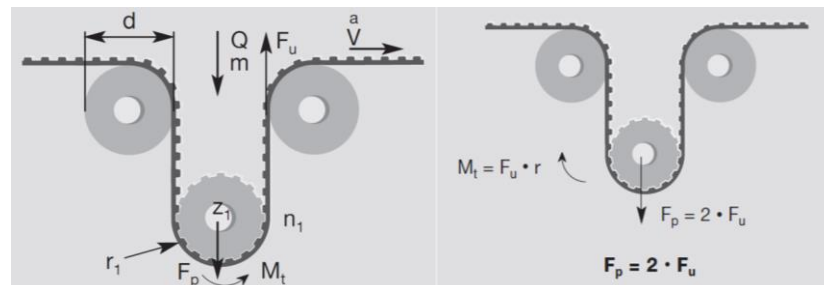


Fig. 2.37. Diagrama de fuerzas de una transmisión tipo omega. Fuente: Megalinear [22].

Se realizará el cálculo y selección de la banda dentada para el movimiento horizontal debido a que en ese sentido se desplaza la mayor carga móvil. A partir de los datos previos se sigue el procedimiento dispuesto en el catálogo

- $n_1 = 10,42$ rpm
- $P = 90$ Watts
- $M_t = 3,0$ N.m

a. Selección del paso de la banda dentada

Mediante las curvas mostradas en la Figura 2.38 y considerando los valores de P y n_1 se selecciona una banda tipo T5 ya que los valores son inferiores a los que marcan las escalas.

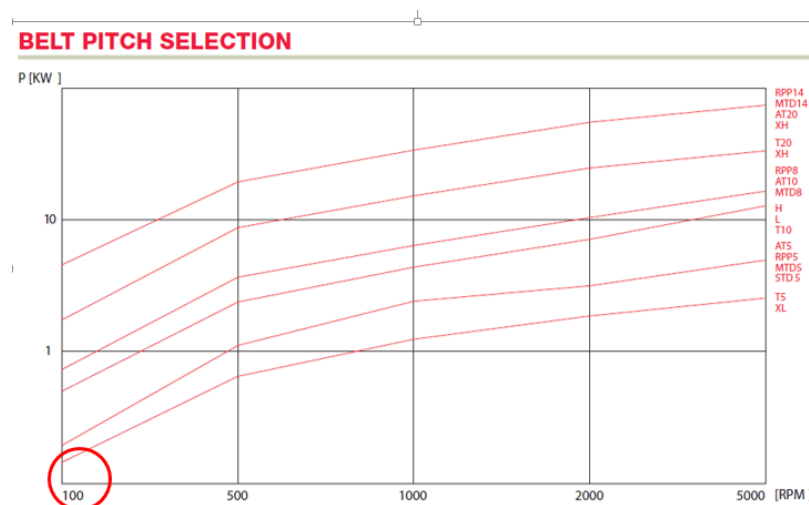


Fig. 2.38. Curvas para selección de paso de la banda dentada. Fuente: Megalinear pág. 10 [22].

En la página 28 del catálogo Megalinear [22] se indica que tiene un paso de 5 mm y alma de acero. Se selecciona una polea motriz de $Z= 15$, $D_p= 23,87$ mm y $De= 23,04$ mm como se puede observar en la Figura 2.39.

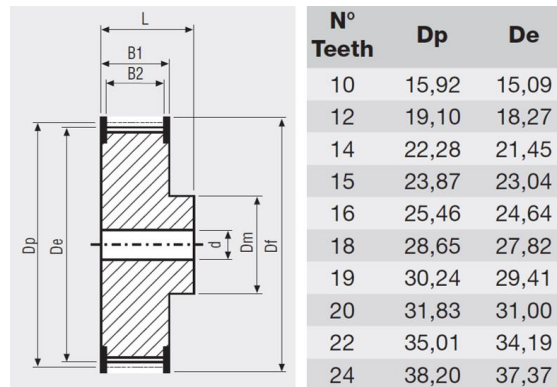


Fig. 2.39. Polea motriz: Z , D_p y De . Fuente: Megalinear pág. 28 [22].

b. Cálculo de la tensión efectiva

Como se puede observar en la Figura 2.40 para el F_u calculado correspondería un ancho de banda dentada de 16mm.

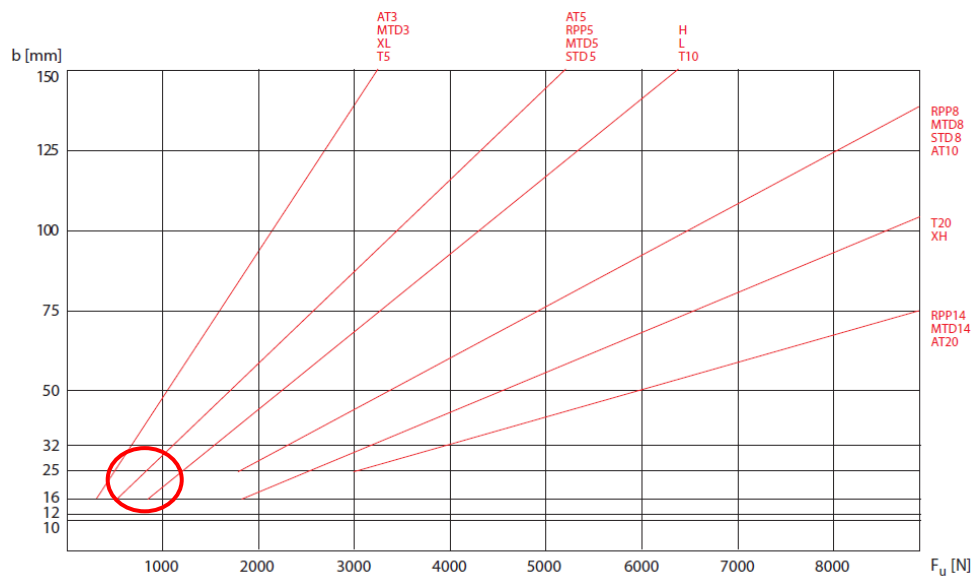


Fig. 2.40. Curvas para selección del ancho de la banda dentada. Fuente: Megalinear pág. 10 [22].

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (27).

$$F_u = \frac{2000 M_t}{d_1} \quad (27)$$

De donde:

F_u : Tensión efectiva

M_i : Torque de accionamiento 3,0 N.m

d_l : Diámetro primitivo de la polea motriz 23,04 mm

$$F_u = \frac{2000 * 3,06 \text{ N}}{23,04 \text{ mm}} = 265,625 \text{ N}$$

c. Verificación del ancho de la banda

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (28).

$$b = \frac{F_u * C_s * 10}{F_{p \text{ spec}} * Z_m} \quad (28)$$

De donde:

C_s : Factor de seguridad 1.4 para carga baja (Megalinear pág. 11 [34].)

$F_{p \text{ spec}}$: Resistencia por diente 24 N/cm a 10 RPM (Megalinear pág. 28 [34].)

Z_m : Dientes engranados Se calculan con la ecuación (29)

$$Z_m = \left[0.5 - \frac{4 * p}{79 * c} (Z_L - Z_S) \right] * Z_S \quad (29)$$

De donde:

Z_L : Dientes del engranaje conducido 0

Z_S : Dientes del piñón conductor 15

p : Paso 5 mm

c : Distancia entre centros

In omega application to grant good mesh between pulley and teeth and to respect belt flexibility avoiding excessive stress on cords, distance d (as drawing 4) has to be:

d = 4 • belt width
Suggested angle 120°

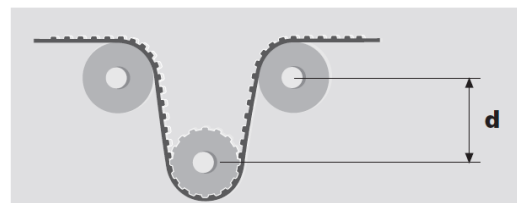


Fig. 2.41. Distancia entre centros de una transmisión tipo omega. Fuente: Megalinear pág. 13 [22].

La distancia entre centros para una transmisión tipo omega se calcula como muestra la Figura 2.41. Debido a cálculos preliminares el ancho de 16 mm no cumple con los requerimientos y el siguiente ancho disponible en el catálogo es de 25mm.

Por lo tanto:

$$c = d = 4 * \text{ancho de la banda}$$

$$c = 4 * 25\text{mm} = 100\text{m}$$

Luego

$$Z_m = \left[0,5 - \frac{4*5\text{mm}}{79*100\text{ mm}} (0 - 15) \right] * 15$$

$$Z_m = 8,06 \approx 8 \text{ dientes}$$

$$b = \frac{265,625 \text{ N} * 1,4 * 10}{24 \frac{\text{N}}{\text{cm}} * 8}$$

$$b = 19,36 \text{ mm}$$

Debido a que localmente se encuentra un representante del fabricante, es posible adquirir la correa dentada con el ancho obtenido.

d. Fuerza de pre-tensado

Como se puede observar en la Figura 2.36 la fuerza de pre-tensado se calcula con la ecuación (30):

$$F_p = 2 * F_u \quad (30)$$

$$F_p = 2 * 265,625 \text{ N} = 531,25 \text{ N}$$

e. Comprobación de la banda a tracción

Para esta comprobación es necesario que la carga máxima de tracción de la banda seleccionada sea mayor que el valor obtenido con la ecuación (31):

$$\frac{F_p}{2} + (F_u * C_s) \quad (31)$$

$$\frac{531,25 \text{ N}}{2} + (265,625 \text{ N} * 1,4) = 637,5 \text{ N}$$

La carga máxima de tracción de la banda T5 de 19,36 mm de ancho es 700N, luego

$$637,5 \text{ N} < 700\text{N}$$

Por lo que se comprueba la resistencia a tracción de la banda seleccionada.

f. Elongación

Se determina mediante la aplicación de la ecuación (32).

$$\Delta l / l_0 = \frac{F_u * 4}{\text{carga max de tracción}} \quad (32)$$

$$\Delta l / l_0 = \frac{265,625 \text{ N} * 4}{700 \text{ N}} = 1,51 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

Es decir que en situaciones dinámicas se va a tener una elongación máxima de 1,26 mm por metro de banda en operación.

2.5.3. Selección de poleas tensoras

En la página 29 del manual Megalinear, se especifica que para una banda con alma de acero y una polea motriz de $Z=15$ el diámetro mínimo de las poleas tensoras es de 30 mm, por lo que estas serán adquiridas conjuntamente con la banda y polea motriz.

2.6. Estructura o bastidor

Se encuentra compuesto por varios marcos rígidos los cuales soportan el peso de los elementos móviles y materia prima. En la Figura 2.42 se pueden observar los componentes de la estructura de la máquina los cuales cumplen con diferentes funciones de acuerdo a su forma, dimensiones y posición detalladas a continuación en la Tabla 2.10.

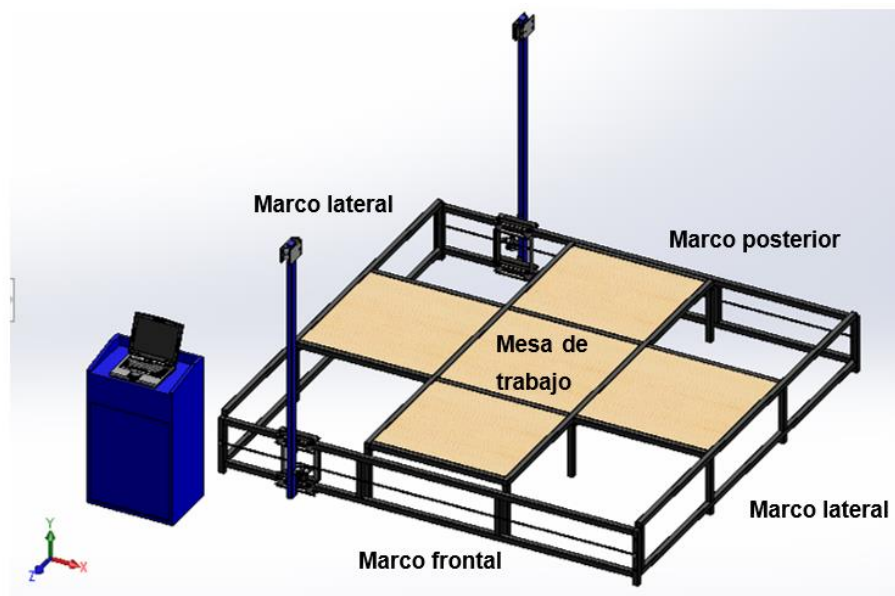


Fig. 2.42. Componentes de la estructura de la máquina. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.10.
Detalle de componentes de la estructura

Componente	Función	Posición
Marco rígido frontal	Guía carro horizontal	Eje X
Marco rígido posterior	Guía carro horizontal	Eje X
Marco rígido lateral (2)	Unión de componentes	Eje Z
Mesa de trabajo	Base para materia prima	Eje X-Z

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Se realizará el análisis de los miembros más críticos de los marcos rígidos más comprometidos a carga

2.6.1. Marco rígido frontal – Eje X

Se encuentra compuesto principalmente por dos vigas sobre las cuales se deslizan los carros horizontales como se puede observar en la Figura 2.43.

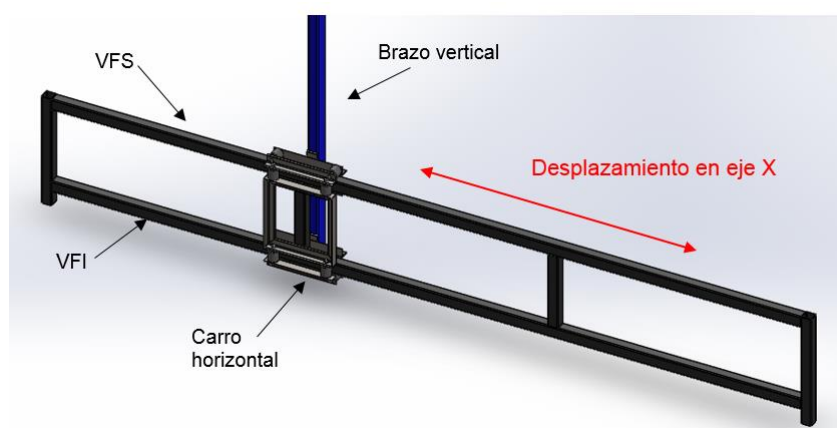


Fig. 2.43. Detalle de ensamble de carro horizontal sobre marco rígido frontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para facilidad de identificación se las denominará como viga frontal superior (VFS) y viga frontal inferior (VFI).

En las Figuras 2.44a y 2.44b se pueden observar las dimensiones de los componentes del marco horizontal y la denominación dada a cada junta respectivamente.

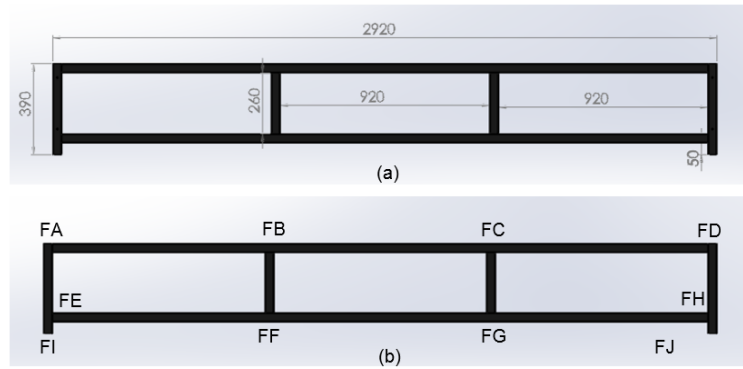


Fig. 2.44. Marco rígido frontal: (a) Dimensiones, (b) Juntas. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para realizar el análisis se consideran los siguientes parámetros:

- Tipo de sección: Cuadrada 40*40*2 mm de acuerdo al proveedor Dipac [44].
- Material: Acero ASTM A500 Grado A
- Longitud entre apoyos: 2920 mm
- Carga puntual viga superior en eje Z: $C_{VT} = -155,13$ N en la mitad del elemento.
- Carga puntual viga superior en eje Y: $C_B = 255,78$ N en la mitad del elemento.
- Carga puntual viga inferior en eje Y: $C_A = -211,68$ N en la mitad del elemento.

En la Figura 2.45 se puede observar el marco rígido con las cargas actuantes en cada viga de acuerdo a los ejes especificados. La carga en eje Z se encuentra detallada en la Tabla 2.8.

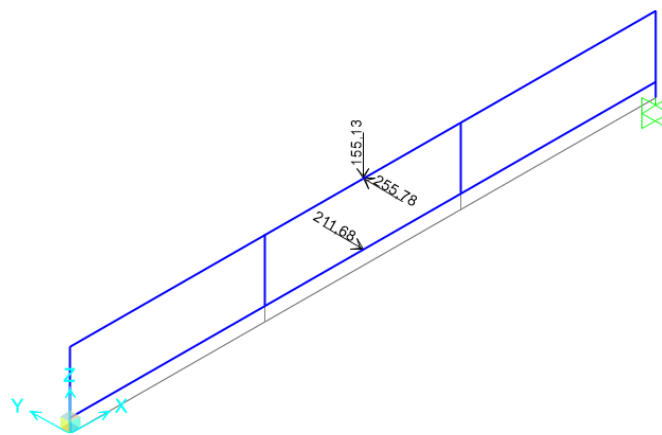


Fig. 2.45. Cargas actuantes en marco rígido frontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La obtención de resultados se enfoca en la viga frontal superior que es la que está sometida a cargas en dos sentidos. Se ha considerado el propio peso de los elementos dentro del análisis. Se obtiene un valor de ratio de 0.137 como se puede observar en la Figura 2.46, lo cual muestra el bajo nivel de esfuerzo actuante al que se encuentra sometida la viga superior al igual que el marco rígido en su totalidad.

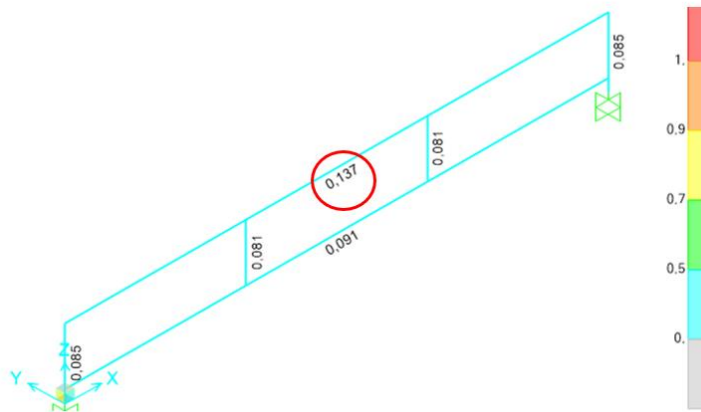


Fig. 2.46. Ratio del análisis en marco rígido frontal. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 2.11 se muestra el detalle de los resultados obtenidos que se pueden observar en la Figura 2.47.

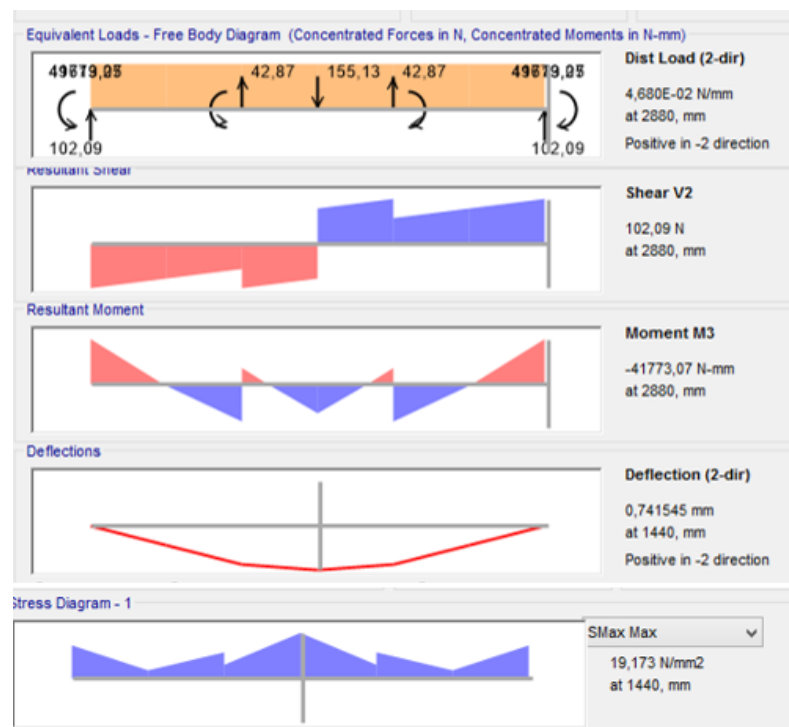


Fig. 2.47. Resultados de análisis en VFS bajo acción de carga vertical C_{VT} . Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.11.
Resultados de análisis de VFS bajo acción de carga vertical C_{VT}

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	102.09 N	FA y FD
Carga	Reacción	42.87 N	FB y FC
Cortante	Máximo	102.09 N	FA y FD
Momento resultante	Máximo	41773.07 N.mm	FA y FD
Deflexión	Máximo	0.742 mm	En $l=1440$ mm
Flexión	Máximo X-X	19.13 MPa	En $l=1440$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 2.12 muestra el detalle de los resultados obtenidos que se pueden observar en la Figura 2.48.

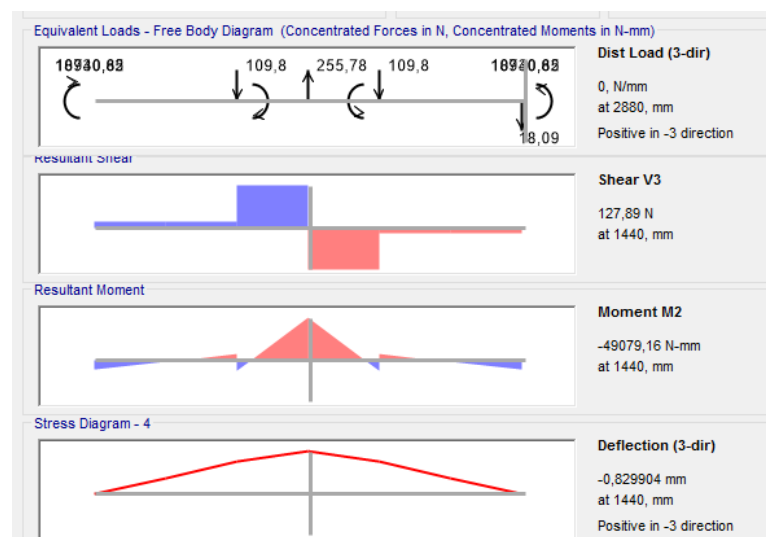


Fig. 2.48. Resultados de análisis en VFS bajo acción de carga horizontal C_B . Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.12.
Resultados de análisis de VFS bajo acción de carga vertical C_{VT}

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	109.8 N	FE y FH
Carga	Reacción	18.09N	FF y FG
Cortante	Máximo	127.89 N	En $l=1440$ mm
Momento resultante	Máximo	49079.16 N.mm	En $l=1440$ mm
Deflexión	Máximo	0.829 mm	En $l=1440$ mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los valores permisibles de esfuerzo de flexión y deflexión obtenidos son los que se muestran a continuación:

- Esfuerzo permisible a flexión

$$\sigma_p = 0,66 S_y$$

$$S_y \text{ acero ASTM A500} = 270 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = 0,66 * 270 \text{ MPa} = 178,2 \text{ MPa}$$

$$19,13 \text{ MPa} < 178,2 \text{ MPa}$$

- Deflexión permisible

De acuerdo a Mott, Robert, pág. 777 [37], los límites de deflexión recomendados para partes de máquinas en general se encuentran en 0,0005 a 0,003 mm/mm, en ese sentido se tiene que:

$$y_{\max perm} = 0,0005 \text{ mm} * \frac{2920 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 1,46 \text{ mm}$$

$$0,829 \text{ mm} < 1,46 \text{ mm}$$

Debido a los resultados obtenidos de ratio y deflexión máxima para las cargas vertical y horizontal, los cuales se encuentran por debajo de los límites permisibles se considera válido el uso del perfil angular de 40*40*2mm de calidad ASTM A500. Desde el punto de vista mecánico, el tener un valor de deflexión por debajo del límite permisible no permite afectaciones en la precisión del desplazamiento del carro horizontal.

2.6.2. Mesa de trabajo

Permite montar el bloque de materia prima y posicionarlo de acuerdo al tipo de trabajo a realizar. Está cubierta de tableros de madera como se puede observar en la Figura 2.49, se tiene dos tableros de 820 mm* 920 mm y tres tableros de 920 mm * 920 mm.

De acuerdo al tipo de tablero y espesores que ofrece el fabricante nacional Novopan se ha considerado emplear tableros de densidad media MDP de 12 mm de espesor con una masa de 8,2 kg/m² de acuerdo a la ficha técnica de paneles MDP Novopan [45].

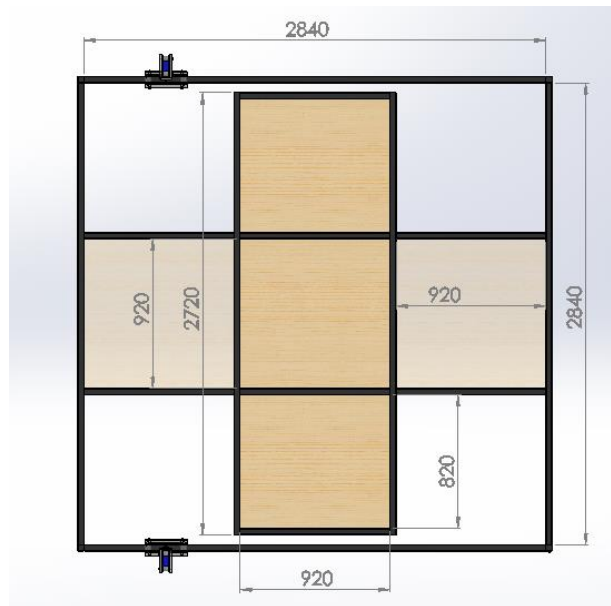


Fig. 2.49. Dimensiones de tableros de madera en la mesa de trabajo. Vista superior. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

El detalle del peso de cada tablero se puede observar en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13.
Peso de tableros de madera de la mesa de trabajo

Tablero	Dimensiones	Área	Masa	W_T	$W_{T/4}$
Rectangular	0.82*0.92 m	0.754m ²	6.18 kg	60.56 N	$W_{T/4 \text{ rect}} = 15.14 \text{ N}$
Cuadrado	0.92*0.92 m	0.846m ²	6.94 kg	68.012 N	$W_{T/4 \text{ cuad}} = 17 \text{ N}$

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Cada tablero se encuentra soportado por los cuatro lados, de manera que en el punto medio de cada lado actúa una carga igual a $W_{T/4}$ detallado en la tabla 2.13. En la Figura 2.50 se puede observar la distribución de carga de los tableros sobre la mesa de trabajo con los parámetros que se muestran a continuación:

- Tipo de sección: Tubular cuadrada 40*40*2 mm
- Material: Acero ASTM A500
- Tipo de apoyos: Empotrados
- Cargas en Eje Z: Posicionadas en el punto medio de los tramos de viga.

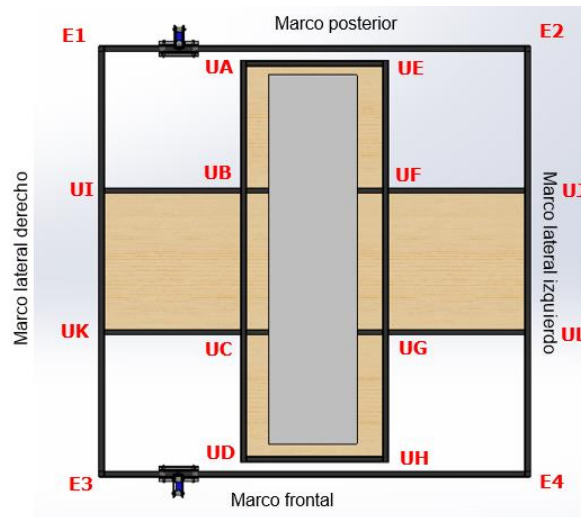


Fig. 2.52. Identificación de uniones de mesa de trabajo. Vista superior Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

a. Análisis de cargas en posición 1

En esta posición el bloque está soportado por las vigas UD-UA y UH-UE sin tomar en cuenta los tramos UB-UF y UC-UG, que serán analizados en la posición 2 ya que en ese caso estarán sometidos a mayor esfuerzo. La carga distribuida con la que actúa el bloque en esta posición es la siguiente:

$$W_{eps.pos1} = \frac{265\text{N}}{2.5\text{ m}} = 106 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

En la Figura 2.53 se puede observar el esquema de las vigas UD-UA y UH-UE con la carga distribuida del bloque de poliestireno expandido.

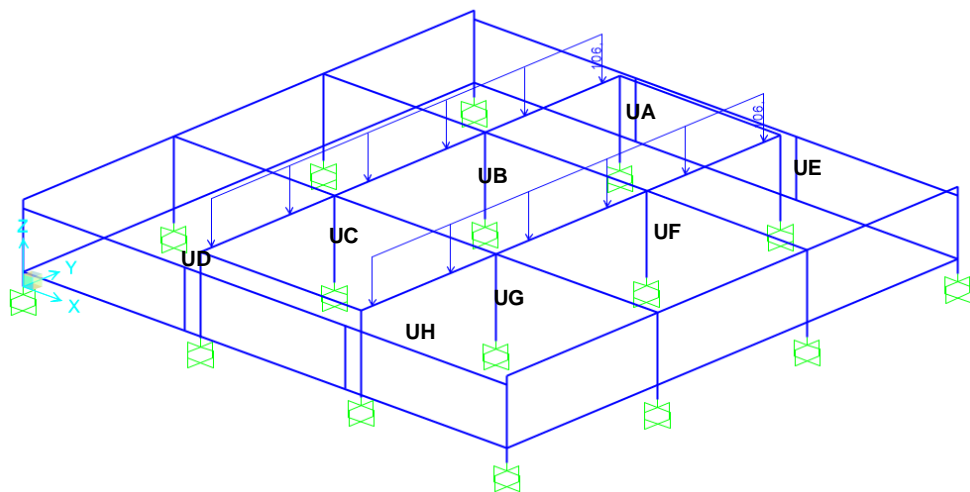


Fig. 2.53. Carga distribuida del bloque de EPS en posición 1. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Debido a que en las dos vigas actúan las mismas cargas en las mismas condiciones, se realizará el análisis en la viga UD-UA, cuyo esquema se puede observar en la Figura 2.54.

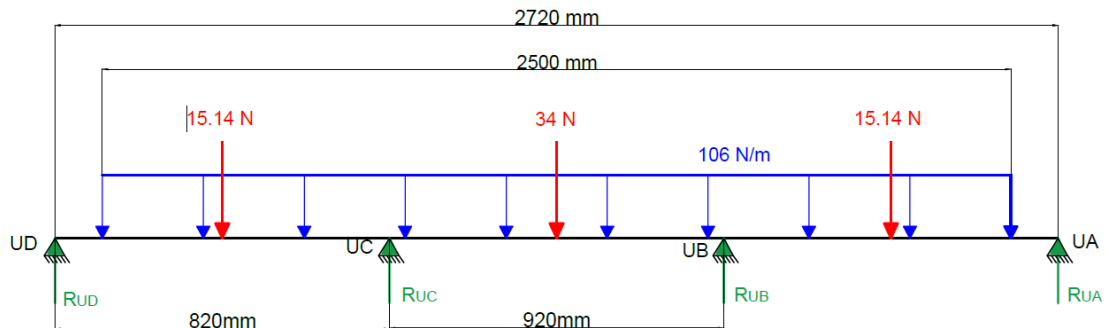


Fig. 2.54. Esquema de cargas actuantes en viga UD-UA. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para el análisis se empleará las especificaciones que se muestran a continuación:

- Tipo de sección: Tubular cuadrada 40*40*2 mm
- Material: Acero ASTM A500
- Tipo de apoyos: Empotrados
- Cargas en Eje Z: Combinación de cargas puntuales de tableros de madera, carga distribuida del bloque de EPS y peso propio del elemento evaluado (COMB 1).

Luego de haber efectuado el análisis se obtienen los siguientes resultados:

Se obtiene un valor de ratio de 0,018 como se puede observar en la Figura 2.55, lo cual muestra el bajo nivel de esfuerzo actuante al que se encuentra sometida la viga UD-UA.

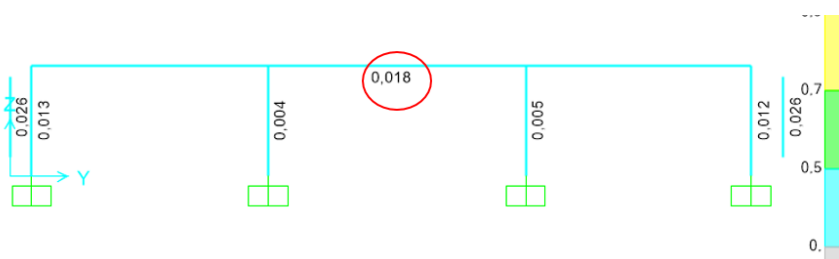


Fig. 2.55. Ratio del análisis en viga UD-UA. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los ratios de los demás elementos aún no se pueden considerar válidos debido a que aún no se analiza la posición 2 del bloque de poliestireno expandido. Los detalles de

los diferentes diagramas que se pueden observar en la Figura 2.56 se muestran en la Tabla 2.14 relacionando los valores obtenidos con las uniones definidas en la Figura 2.52.

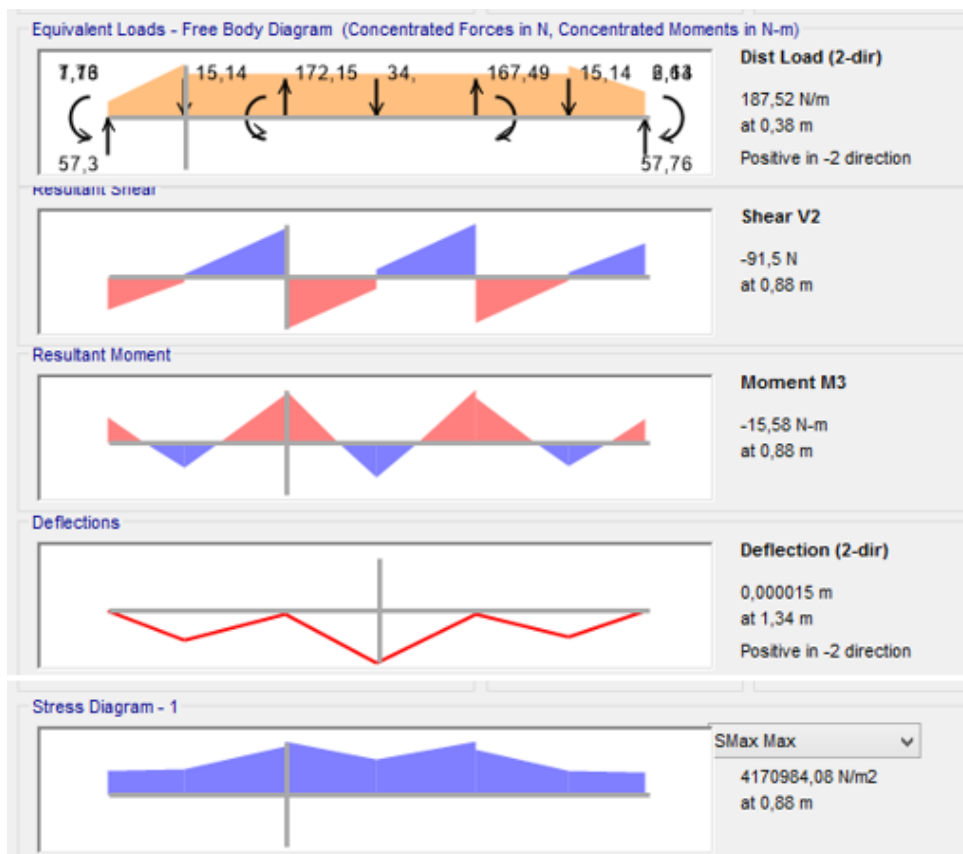


Fig. 2.56. Resultados de análisis en viga UD-UA. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.14.
Resultados de análisis de en viga UD-UA.

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	57.3 N - 57.76 N	UD - UA
Carga	Reacción	172.15 N-167.49 N	UC - UB
Cortante	Máximo	91.5 N	UC
Momento resultante	Máximo	15.58 N.m	UC
Deflexión	Máximo	0.015 mm	Punto medio viga
Esfuerzo a flexión	Máximo	4.17 MPa	UC

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

b. Análisis de cargas en posición 2

En este caso se analiza los tramos de viga UB-UF y UC-UG bajo la carga actuante del bloque asentado por la cara de 60 cm de ancho. En ese sentido la carga distribuida que se tiene es:

$$W_{eps.pos2} = \frac{265\text{N}}{0,6\text{ m}} = 441,6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \approx 442 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

En las Figuras 2.57 y 2.58 se pueden observar la carga distribuida del bloque de poliestireno expandido colocado en posición 2 y el esquema de las fuerzas actuantes en la viga UB-UF respectivamente.

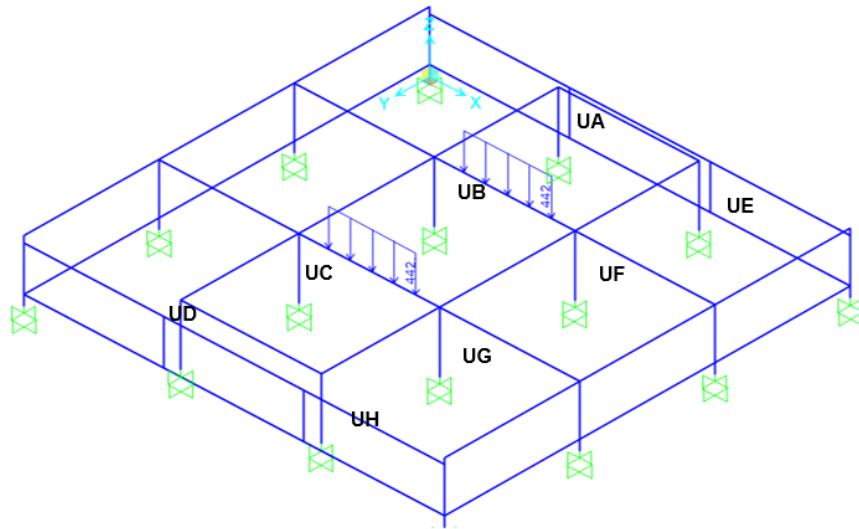


Fig. 2.57. Carga distribuida del bloque de EPS en posición 2. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

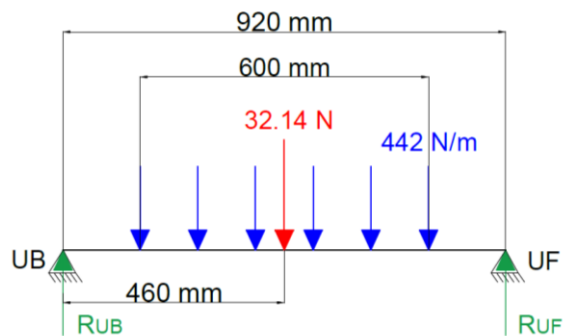


Fig. 2.58. Esquema de cargas actuantes en viga UB-UF. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para el análisis se empleará las especificaciones que se muestran a continuación:

- Tipo de sección: Tubular cuadrada 40*40*2 mm
- Material: Acero ASTM A500
- Tipo de apoyos: Empotrados
- Cargas en Eje Z: Combinación de cargas puntuales de tableros de madera, carga distribuida del bloque de EPS y peso propio del elemento evaluado (COMB 2).

Luego de haber efectuado el análisis se obtiene un valor de ratio de 0,049 como se puede observar en la Figura 2.59, lo cual muestra el bajo nivel de esfuerzo actuante al que se encuentra sometida la viga UB-UF.

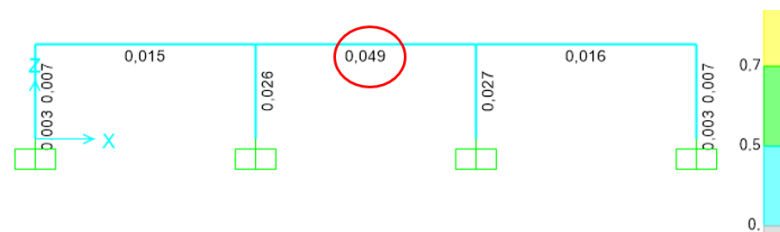


Fig. 2.59. Ratio del análisis en viga UB-UF. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los ratios de los demás elementos aún no se pueden considerar válidos pues no hay una carga aplicada en los otros demás tramos de viga.

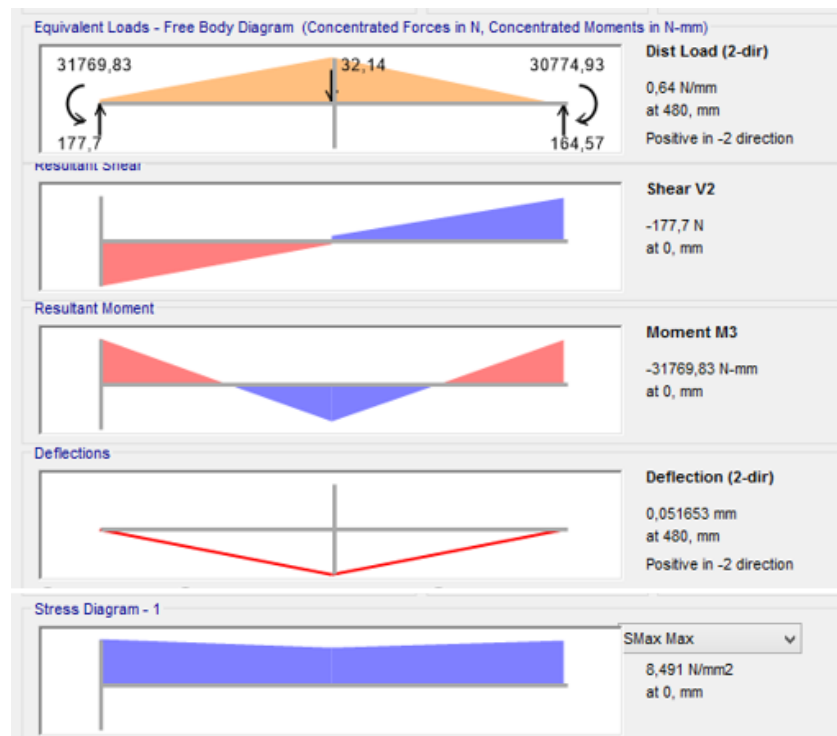


Fig. 2.60. Resultados de análisis en viga UB - UF. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.15.
Resultados de análisis de en viga UB - UF

Diagrama	Tipo de valor	Valor	Ubicación
Carga	Reacción	177.7 N – 164.57 N	UB - UF
Cortante	Máximo	177.7 N	UB
Momento resultante	Máximo	31769.83 N.m	UB
Deflexión	Máximo	0.051 mm	Punto medio viga
Esfuerzo a flexión	Máximo	8.491 MPa	UB

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los resultados de esfuerzos de flexión y deflexiones de las posiciones 1 y 2 se comparan en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16.
Comparación esfuerzos-deflexión posiciones 1 y 2

Resultado	Posición 1	Posición 2
Esfuerzo a flexión máximo	4.17 MPa	8.491 MPa
Deflexión máxima	0.015 mm	0.051 mm

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Como se puede observar los resultados del análisis en posición 2 son mayores que los de la posición 1, por lo tanto se verificará que se encuentren bajo en límite permisible.

- Esfuerzo permisible a flexión

$$\sigma_p = 0,66 S_y$$

$$\sigma_p = 0,66 * 270 \text{ MPa} = 178,2 \text{ MPa}$$

$$8,49 \text{ MPa} < 178,2 \text{ MPa}$$

- Deflexión permisible

$$y_{\max \text{ perm}} = 0,0005 \text{ mm} * \frac{920 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 0,46 \text{ mm}$$

$$0,051 \text{ mm} < 0,46 \text{ mm}$$

Debido a los resultados obtenidos de ratio y deflexión máxima para la posición 2, los cuales se encuentran por debajo de los límites permisibles se considera válido el uso del perfil cuadrado de 40*40*2mm de calidad ASTM A500.

2.6.3. Análisis de columnas

La estructura posee un total de 16 elementos verticales que soportan el peso de los componentes, sistemas la máquina y materia prima. Para realizar el análisis de las columnas se ha considerado completar la carga de la mesa de trabajo con la carga distribuida de 442 N/m como se puede observar en la Figura 2.61. Esta carga fue determinada en la sección anterior.

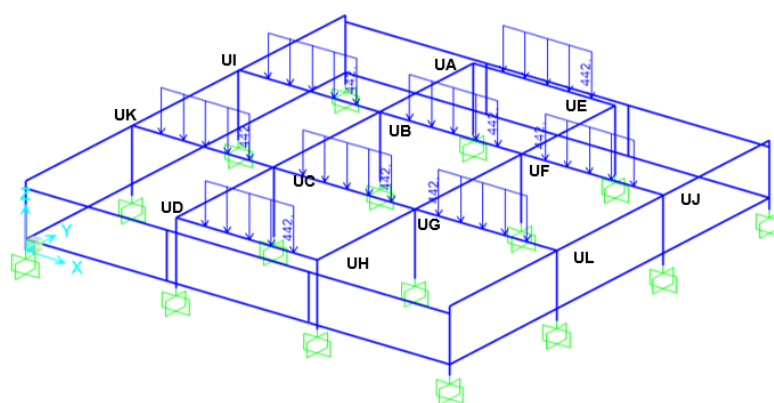


Fig. 2.61. Carga distribuida asignada en elementos no analizados de la mesa de trabajo. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 2.17 se muestra el resumen de las todas las cargas aplicadas sobre la estructura con las cuales será realizado el análisis de columnas.

Tabla 2.17.
Resumen de cargas actuantes sobre estructura

Nombre	Valor	Eje	Ubicación
C_{VT}	155.13 N	Z	Marco frontal-posterior
C_A	211.68 N	Y	Marco frontal-posterior
C_B	255.78 N	Y	Marco frontal-posterior
$W_{T/4 \text{ rect}}$	15.14 N	Y	Mesa de trabajo
$W_{T/4 \text{ cuad}}$	17 N	Y	Mesa de trabajo Marco lateral
$W_{\text{eps.pos1}}$	106 N/m	Y	Mesa de trabajo
$W_{\text{eps.pos2}}$	442 N/m	Y	Mesa de trabajo

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Figura 2.62 se puede observar los valores de fuerzas y momentos resultantes en cada columna obtenidos del análisis considerando las siguientes especificaciones:

- Tipo de sección: Tubular cuadrada 40*40*2 mm
- Material: Acero ASTM A500
- Tipo de apoyos: Empotrados
- Cargas en Eje Z: Combinación de cargas puntuales de tableros de madera, carga distribuida del bloque de EPS y peso propio del elemento evaluado (COMB 3).
- Cargas en Eje Y: Cargas C_B y C_A detalladas en la Tabla 2.17. Estas cargas se encuentran en la combinación COMB 3.

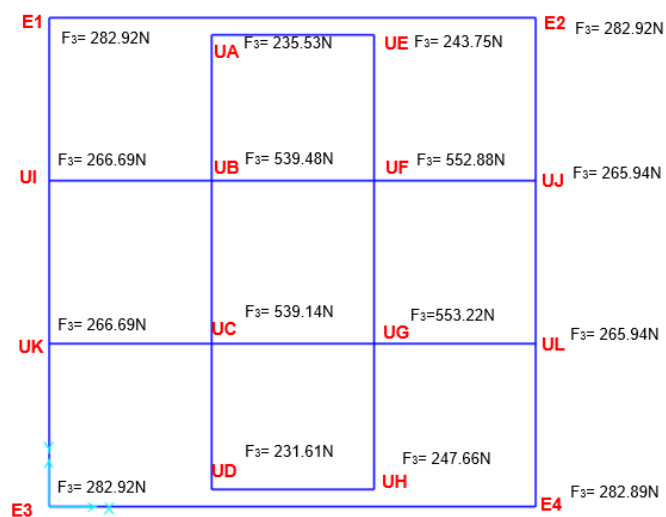


Fig. 2.62. Fuerzas resultantes en columnas de la estructura. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

De los valores que se pueden observar en la Figura 2.62 se tiene que en las columnas ubicadas en UB, UC, UF y UG actúan los valores más altos de F_3 que corresponde a la carga vertical en el eje Z con un promedio de 516,48 N, en ese sentido se realizará el análisis a compresión del elemento ubicado en UG con los datos que se muestran a continuación:

- Radio de giro $r_{min} = 15,3\text{mm}$
- S_y Acero A500 grado A $S_y = 270\text{ MPa}$
- Longitud de columna $L_{col} = 392\text{ mm}$
- Área del perfil $A = 294\text{ mm}^2$
- Módulo de elasticidad $E = 207000\text{ MPa}$
- Factor K columna $K = 0,65$

El factor K corresponde a una columna con los dos extremos empotrados, de acuerdo a Mott, Robert, pág. 235 [37]. En la Figura 2.63 se puede observar un esquema de la columna. El análisis se realizará siguiendo el procedimiento propuesto por Mott, Robert, págs. 234-241 [37].

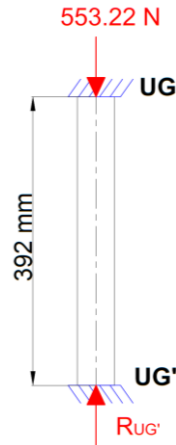


Fig. 2.63. Diagrama de carga de columna analizada. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

a. Relación de esbeltez

Se obtiene aplicando la ecuación (33).

$$\lambda = \frac{KL}{r_{min}} = \frac{0.65 \cdot 392 \text{ mm}}{15.3 \text{ mm}} \quad (33)$$

$$\lambda = 16,65$$

b. Constante de columna

Se obtiene aplicando la ecuación (34).

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 207000 \text{ MPa}}{270 \text{ MPa}}} \quad (34)$$

$$C_c = 123,02$$

Como se puede observar, $\lambda < C_c$ por lo que el elemento analizado representa una columna corta o puntal.

c. Carga crítica permisible

Se obtiene aplicando la ecuación (35).

$$P_{cr} = A \cdot S_y \left[1 - \frac{S_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (35)$$

$$P_{cr} = 294 \text{ mm}^2 * 270 \text{ MPa} \left[1 - \frac{270 \text{ MPa}(16,65)^2}{4\pi^2 * 207000 \text{ MPa}} \right]$$

$$P_{cr} = 78652,9\text{N} = 78,65 \text{ kN}$$

$$553,22 \text{ N} \ll 78,65 \text{ kN}$$

La carga real aplicada es mucho menor que la carga permisible de compresión en la columna analizada. En ese sentido el elemento evaluado cumple el análisis a compresión considerando valido el empleo de la sección de 40*40*2mm.

Finalmente del software de simulación se obtiene la lista de materiales que se puede observar a continuación en la Tabla 2.18:

Tabla 2.18.
Lista de materiales para estructura

Sección	Tipo de objeto	Piezas	Longitud total	Peso total
Tubo cuadrado 40*40*2mm	Estructural	42	43,872 m	1026,59 N

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los perfiles de sección cuadrada de 40*40*2mm se consideraron principalmente para las vigas, los cuales en el mercado local poseen una longitud estándar de 6m y un precio asequible. Luego de emplearse la longitud requerida para las vigas quedan remanentes que resultan útiles para longitudes más pequeñas. Por este motivo se lo empleará para la construcción de la estructura en su totalidad.

2.6.4. Diseño de juntas soldadas

Los elementos de los marcos rígidos y mesa de trabajo se encuentran unidos mediante soldadura y la unión entre marcos se realizará mediante pernos.

Debido a que la mayoría de elementos soldados se encuentran bajo cargas de compresión y en ese caso el esfuerzo de la soldadura es menor, se analizará la soldadura en los tramos transversales de la mesa de trabajo, ya que por su ubicación se encuentran sometidos a corte.

Específicamente se analizará la unión en el punto UB como se puede observar en la Figura 2.64 y detallada en la Tabla 2.19.

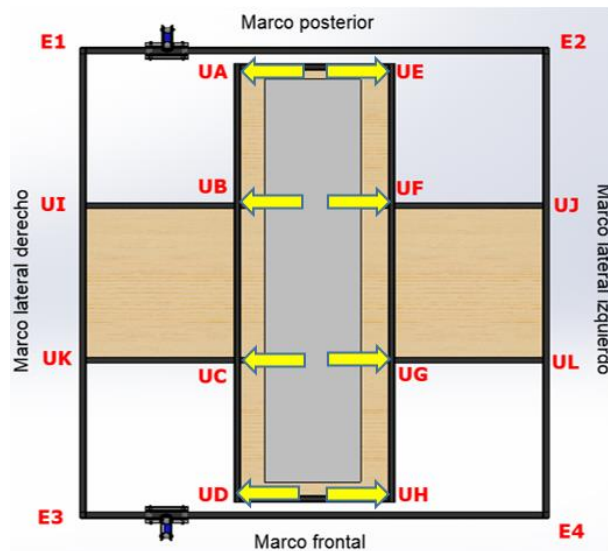


Fig. 2.64. Uniones soldadas en mesa de trabajo. Vista superior. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 2.19.
Detalle de juntas soldadas en estructura.

Elementos a unirse	Punto de unión	Carga	Tipo de carga
UA-UD y UB-UF	UB	177.7 N	Cortante

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

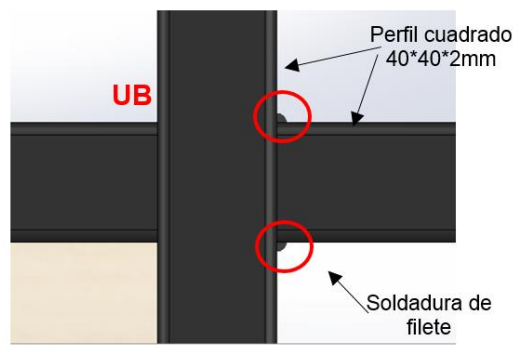


Fig. 2.65. Vista superior de la junta soldada en el punto UB. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La forma de la geometría a ser soldada se puede observar en la Figura 2.65 y de acuerdo a la información para uniones soldadas de Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.459 [31] esta requiere una soldadura de filete como se observa en la Figura 2.66. Se aplicará el procedimiento propuesto por Mott, Robert, págs. 783-787 [37], mediante análisis a corte.

Soldaduras de filete. a) El número indica el tamaño del cateto; la flecha debe apuntar sólo hacia una de las soldaduras cuando ambos lados son iguales. b) El símbolo indica que las soldaduras son intermitentes y con longitud de 60 mm y con una distancia de 200 mm entre centros.

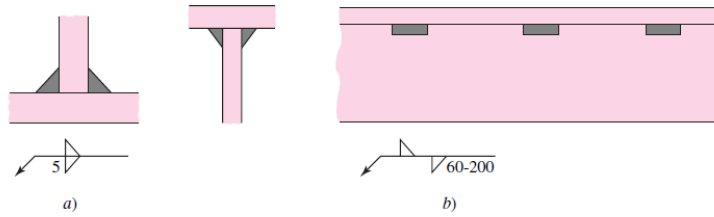


Fig. 2.66. Detalle de soldadura de filete. Fuente: Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, pág.459 [31].

- **Geometría de la unión**

Como se puede observar en la Figura 2.65 se empleará soldadura de filete en las esquinas internas formadas por los elementos a unirse.

- **Determinar fuerza por pulgada de soldadura**

De acuerdo a la literatura indicada se muestran a continuación las fórmulas para cada caso de análisis:

$$f_v = \frac{V}{A_w}$$

De donde:

V: Carga de corte $C_{V/2} = 177,7 \text{ N}$

A_w : Factor geométrico $A_w = 2d$;

d: Lado del perfil $d = 40\text{mm}$ (Perfil cuadrado)

$$A_w = 2 * 40\text{mm} = 80\text{mm}$$

$$f_v = \frac{177,7 \text{ N}}{80 \text{ mm}} = 2,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Se considera emplear soldadura por arco eléctrico con electrodo E6011 debido al bajo costo, fácil aplicación y disponibilidad de equipo. Mott, Robert, pág. 785 [37] especifica que un electrodo de tipo E60 tiene una fuerza admisible por pulgada de lado de 9600lb/pulg.

$$9600 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}} = 1681,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

A continuación se calcula la longitud requerida de soldadura:

$$w = \frac{2,22 \frac{N}{mm}}{1681,22 \frac{N}{mm} \text{ por mm de lado}}$$

$$w = 0,00132 \text{ mm}$$

Debido a que el proceso de soldadura es manual se considera que la longitud mínima aplicada será de aproximadamente 15mm por lado, con un ancho máximo de cordón de 3/16 de pulgada (aprox. 5mm) de acuerdo a la literatura especificada.

2.6.5. Diseño de juntas apernadas

Los puntos donde serán aplicadas este tipo de juntas se pueden observar en la Figura 2.67, donde los pernos se encuentran colocados en el sentido de las flechas.

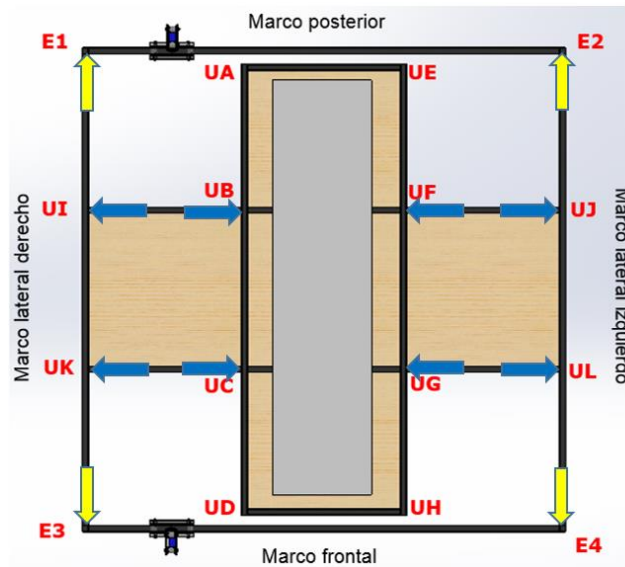


Fig. 2.67. Distribución de juntas apernadas en la estructura. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 2.20 se pueden observar los detalles de las uniones apernadas requeridas:

Tabla 2.20.
Detalle de juntas apernadas en estructura

Flecha	Carga	Pernos	Tipo de carga
Amarilla	$C_A = 211,68 \text{ N}$	2	Tensión
Azul	$R_{UB} = 177,7 \text{ N}$	2	Cortante

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Para la junta apernada que se puede observar en la Figura 2.68 se ha considerado emplear pernos M6 de cabeza hexagonal de grado 8.8 y en la junta de la Figura 2.69, pernos M5 tipo Allen de grado 12.9, de fácil adquisición en el mercado local.

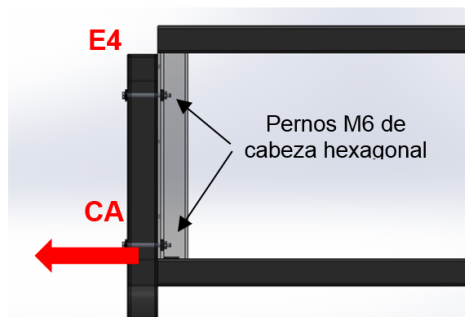


Fig. 2.68. Junta apernada a tensión en E4.

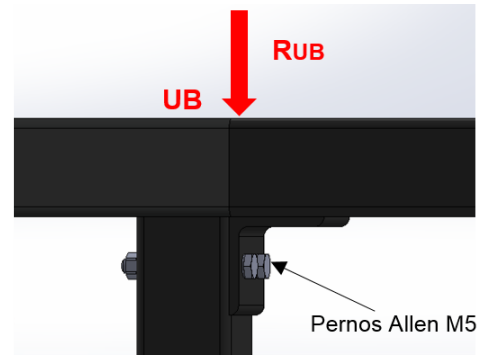


Fig. 2.69. Junta apernada a corte en UB.

Elaborados por: Castillo J, y Obando R (2018).

Debido a que la junta E4 soporta una carga mayor que la junta UB y el perno M6 posee una resistencia menor, se realizara el análisis en base a este elemento. Las características de este perno de acuerdo al proveedor IBCA [38] se muestran a continuación:

- Esfuerzo cortante admisible perno M6 grado8.8: $\tau_{per} = 600 \text{ MPa}$
- Esfuerzo de tensión admisible perno M6 grado8.8: $\sigma_{per} = 800 \text{ MPa}$

Aplicando el procedimiento propuesto por Mott, Robert, pág. 782 [37] para diseño de juntas apernadas se tiene que:

- Área requerida del perno

$$A_t = \frac{R_t}{\sigma_{per}}$$

De donde:

A_t : Área requerida del tornillo

R_t : Carga total aplicada

σ_{per} : Esfuerzo de tensión admisible

$$A_t = \frac{211,68 \text{ N}}{800 \text{ MPa}} = 0,265 \text{ mm}^2$$

- Diámetro requerido

$$D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,265 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,581 \text{ mm} \ll 6 \text{ mm}$$

El diámetro calculado del perno es mucho menor que el diámetro sugerido, en ese sentido el perno cumple el análisis a tensión y se considera válida su aplicación en la unión indicada.

2.7. Sistema de corte

Permite la sujeción y tensado de los hilos de corte entre los carros verticales. Está compuesto por los siguientes elementos:

- Placa de montaje de material aislante:

Consiste de una placa de acrílico que es parte del carro vertical. En esta se sujeta mediante tornillos el perfil T de aluminio con perforaciones como se puede observar en la Figura 2.70. Se ha elegido este tipo de polímero por sus excelentes propiedades de aislamiento eléctrico y mecanización.

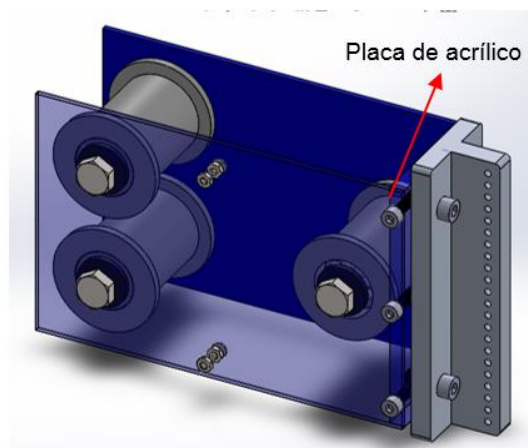


Fig. 2.70. Detalle placa de montaje y perfil T perforado. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

- Perfiles T de aluminio con perforaciones

En este elemento se enganchan los resortes de tracción además de conducir la corriente eléctrica a los hilos de corte. El perfil elegido tiene las dimensiones de $B=50.3\text{mm}$, $A=50.8\text{mm}$ y $E=6.35\text{mm}$ como se puede observar en la Figura 2.71 de acuerdo al catálogo de perfiles tipo T de Cedal [46].

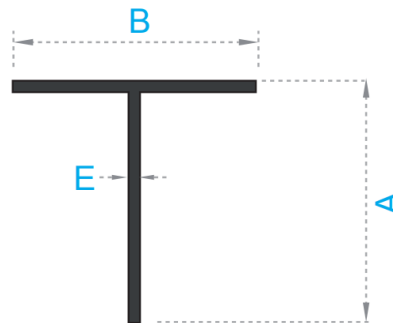


Fig. 2.71. Dimensiones perfil T aluminio Cedal. Fuente: CEDAL [46].

Sin embargo se realizará un ajuste a la dimensión de $A=30\text{mm}$ ya que es la necesaria para disponer de las perforaciones requeridas.

- Resortes de tracción

Es un componente crítico debido a que se encuentra sometido a variaciones de temperatura de corte entre 100 y 120°C . Finalizada la operación la temperatura regresa a la temperatura del ambiente. Las características del resorte del cual se midió la tensión aplicada al hilo de corte son las siguientes:

- Diámetro exterior: 13mm
- Diámetro del alambre: $1,25\text{mm}$
- Longitud: 50mm
- Numero de espirales: 25
- Tipo: Resorte helicoidal de extensión

Según Kalpakjian, Serope, pág. 95 [47] las aleaciones de acero al níquel y cromo poseen una buena resistencia térmica a la fatiga y buena ductilidad, por lo que son aptas para ser empleadas en la fabricación de resortes que trabajan hasta 180°C . En el mercado local se ha consultado sobre la fabricación de este tipo de resortes, como se puede observar en la Figura 2.72, en el material especificado, siendo posible adquirirlos a precios asequibles y por unidades (en total 6 unidades).

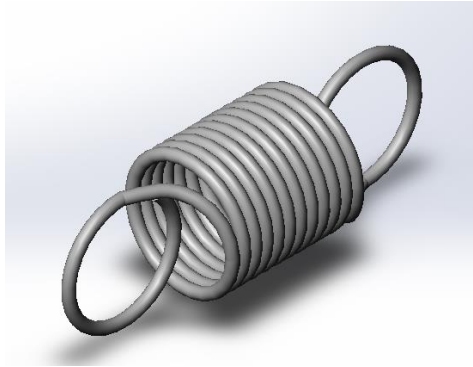


Fig. 2.72. Resorte de tracción para los hilos de corte. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

- Hilo de corte

Esta información se encuentra detallada en la sección 1.3 del capítulo I.

- Dimmer regulador de corriente

En el mercado local se puede adquirir un dispositivo como el que se observa en la Figura 2.73 que permite proveer una corriente de hasta 25 amperios con un voltaje de alimentación con un rango de 110 hasta 400 voltios de corriente alterna (VAC). Es de precio asequible y fácil instalación. Permite regular la intensidad de corriente que circulará por los alambres de níquel-cromo de acuerdo a la cual alcanzarán la temperatura necesaria para el corte, esto se detallará más adelante en las pruebas de corte del capítulo IV.



Fig. 2.73. Dimmer regulador de corriente eléctrico empleado en el proyecto. Fuente: <https://articulo.mercadolibre.com.ec> [48].

CAPÍTULO 3

COSTOS

En este capítulo se detalla los costos involucrados en el desarrollo y construcción de una máquina CNC para corte de poliestireno expandido.

3.1. Costos directos

Los costos de los materiales y componentes adquiridos se detallan a continuación en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

Tabla 3.1.
Costos de materiales para mesa de trabajo

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Tubo estructural cuadrado ASTM A-500 40x40x2mm L= 6 m	8 u	16,06	128,48
Perfil L-ángulo ASTM A-36 40x40x4mm L= 6 m	1 u	9,00	9,00
	Sub-total	-	137,48
	IVA	0,12	16,50
	COSTO 1	-	153,98

Elaborado por: Castillo J., y Obando R (2018).

Tabla 3.2.
Costos de materiales para brazos verticales

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Tubo estructural rectangular ASTM A-500 60x40x3mm L= 6 m	1 u	27,50	27,50
Perfil L-ángulo ASTM A-36 30x30x3mm L= 6 m	1 u	9,00	9,00
	Sub-total	-	36,50
	IVA	0,12	4,38
	COSTO 2	-	40,88

Elaborado por: Castillo J., y Obando R (2018).

Tabla 3.3.

Costos de materiales y componentes para carros horizontales

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Platina ASTM A-36 10x4mm L= 6 m	1 u	6,00	6,00
Ruedas Grilón negro Ø37x40mm	24 u	9,00	216,00
	Sub-total	-	222,00
	IVA	0,12	26,64
	COSTO 3	-	248,64

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.4.

Costos de materiales y componentes para carros verticales

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Placas de acero ASTM A-36 150x100x2mm	4 u	6,00	24,00
Placas de acrílico 100x50x6mm	2 u	18,00	36,00
Ruedas Grilón negro Ø42x46mm	6 u	10,00	60,00
Perfil T aluminio 40x30x4	2 u	35,00	70,00
Resortes de acero inoxidable	6 u	6,00	36,00
Resistencia de níquel-cromo	7,5 m	1,25	9,38
	Sub-total	-	235,38
	IVA	0,12	28,25
	COSTO 4	-	263,62

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.5.

Costos de componentes del sistema de transmisión vertical.

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Correa dentada GT2 (m)	8 m	2,86	22,88
Motores de paso NEMA 17, torque 2,4 kg.cm	2 u	8,00	16,00
Soportes de motor NEMA 17	2 u	10,00	20,00
	Sub-total	-	58,88
	IVA	0,12	7,07
	COSTO 5	-	65,95

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.6.
Costos de componentes del sistema de transmisión horizontal

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Correa dentada T5	6,5 m	33,87	220,16
Mordazas sujeción de correa dentada	4 u	8,00	32,00
Soportes de motor NEMA 23	2 u	15,00	30,00
Motores de paso NEMA 23, torque 3 N.m.	2 u	110,00	220,00
Piñones Z = 15, L = 20 mm	2 u	25,00	50,00
	Sub-total	-	552,16
	IVA	0,12	66,26
	COSTO 6	-	618,41

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.7.
Costos de material eléctrico

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Cable multipar 4x18 AWG	30 m	0,86	25,80
Placa Arduino UNO R3	1 u	15,00	15,00
CNC shield protonner V3	1 u	15,00	15,00
Driver HY DIV2668N-5A	2 u	47,00	94,00
Fuente de poder CPU 500 W	1 u	20,00	20,00
Borneras 6 Amp	4 u	0,67	2,68
Manguera Corrugada de 1 1/4 "	20 m	1,32	26,40
Conectores para manguera corrugada	3 u	0,22	0,66
Dimmer 25Amp	1 u	26,00	26,00
Cable flexible #10	15 m	0,85	12,75
	Sub-total	-	238,29
	IVA	0,12	28,59
	COSTO 7	-	266,88

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.8.
Costos de materiales consumibles

Descripción	Cantidad necesaria	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Diluyente Tinner	1 galón	4,85	4,85
Electrodos revestidos E 6011-1/8	1 kg	2,95	2,95
Pintura anticorrosiva	1/2 galón	11,86	11,86
Pintura azul	1/4 galón	6,18	6,18
Pintura negra	1/8 galón	3,27	3,27
Amarracable 4"x2,5mm	1 funda	0,67	0,67
Ángulos niquelados de 1"	42 u	0,09	3,78
Arandela plana 1/8	8 u	0,04	0,32
Arandela plana M10 grande	4 u	0,05	0,20
Arandela plana M10 pequeña	8 u	0,04	0,32
Arandela plana M4	44 u	0,01	0,44
Arandela plana M5	32 u	0,01	0,32
Arandela plana M8	82 u	0,04	3,28
Arandela plana M8 pequeña	4 u	0,03	0,12
Disco de corte 4 1/2"	4 u	1,00	4,00
Juego de brocas HSS	1 u	6,00	6,00
Kit copa-Sierra	1 u	5,25	5,25
Marcador permanente	2 u	1,98	3,96
Gabinete de control	1 u	100,00	100,00
Niveladores	16 u	0,35	5,60
Perno Allen M4X10	20 u	0,04	0,80
Perno Allen M4X15	8 u	0,04	0,32
Perno Allen M4X20	24 u	0,05	1,20
Perno Allen M5X10	8 u	0,25	2,00
Perno Allen M5X60	16 u	0,38	6,08
Perno Allen M8X40	2 u	0,08	0,16
Perno hexagonal M8X60	32 u	0,24	7,68
Perno hexagonal M8X70	10 u	0,30	3,00
Pernos cabeza redonda 1/8x1"	4 u	0,05	0,20
Prisionero M5X5	2 u	0,03	0,06
Rodamientos 22-8-8*	20 u	0,63	12,60
Rodamientos 30-10-9*	8 u	0,85	6,80
Rodamientos 22-7-8*	48 u	0,59	28,32
Tablero MDF	1 u	32,00	32,00
Tapas de caucho 40x40	12 u	0,15	1,80
Tuerca 1/8	4 u	0,06	0,24
Tuercas de seguridad M6	8 u	0,03	0,24
Tuercas de seguridad M4	24 u	0,02	0,48

Tuercas de seguridad M5	16 u	0,02	0,32
Tuercas de seguridad M8	44 u	0,03	1,32
Varilla roscada M6x1000mm	2 u	1,50	3,00
	Sub-total	-	271,99
	IVA	0,12	32,64
	COSTO 8	-	304,63

Nota: * Los rodamientos son lubricados y sellados y se detallan las dimensiones de diámetro exterior, diámetro interior y espesor.

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

La suma de los costos totales de los materiales utilizados (material directo) es de \$1962,99. Los costos que involucran mano de obra (soldador, ayudante y ensamblador) se los detalla a continuación en la Tabla 3.9. El costo por hora se tomó en base a la tabla de salarios sectoriales mínimos para el 2018 en el sector de la metalmecánica, teniendo en cuenta que se laboran 8 horas diarias por 5 días a la semana y por 4 semanas al mes obteniendo un total de 160 horas laborales. En ese sentido y de acuerdo a la información obtenida se tiene lo siguiente:

- Operador general metalmecánica (cerrajero) \$400,27
- Técnico sector metalmecánica (Ensamblador) \$400,54

Tabla 3.9.
Costos de mano de obra directa

Cargo del personal	horas/hombre	Cantidad personas	\$/hora	Sub-total (\$)
Soldador	40	1	2,50	100,00
Ayudante de soldador	40	1	2,50	100,00
Ensamblador	40	2	2,50	200,00
		Costo D		400,00

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 3.10 se puede observar el detalle de los costos correspondientes al diseño de ingeniería y supervisión técnica de la construcción. Los salarios mínimos para estos cargos se detallan a continuación, teniendo en cuenta 160 horas laborales al mes:

- Jefe primer nivel sector metalmecánica nivel B1: \$400,92
- Supervisor sector metalmecánica: \$400,65

Tabla 3.10.
Costos de ingeniería y supervisión

Cargo del personal	horas/hombre	Cantidad personas	\$/hora	Sub-total (\$)
Ingeniería del diseño	80	2	2,50	400,00
Supervisión Técnica	24	1	2,50	60,00
Costo I				460,00

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

El costo total resultante de la suma de materiales, mano de obra y trabajo de ingeniería se detalla a continuación:

- Costo total de materiales e insumos empleados: \$1962,99
- Costo de mano de obra directa: \$400,00
- Costo de trabajo de ingeniería y supervisión: \$460,00
- Costo total : \$2822,99

3.2. Costos de depreciación

Consiste en distribuir el costo de la maquinaria menos su valor de desecho a través de la vida útil del mismo [49]. Se obtiene mediante la ecuación (36):

$$D = \frac{C - VR}{N} \quad (36)$$

Dónde:

D: Depreciación (\$/año)

C: Costo (\$)

VR: Valor residual (\$)

N: Vida útil (años)

De acuerdo al artículo 28 literal c del Reglamento de Aplicación de la Ley de Régimen Tributario Interno [50] se depreciará a un periodo de 10 años.

Como valor residual se considera un 10% de la suma de los siguientes valores:

$$C = \text{Costo1} + \text{Costo2} + \text{Costo3} + \text{Costo4} + \text{Costo5} + \text{Costo6} + \text{Costo7} + \text{Costo8} + \text{Costo D} + \text{Costo I}$$

$$C = \$2822,99$$

$$VR = \$ 282,29$$

Así se obtiene que el valor de la depreciación es:

$$D = \frac{2822,99 - 282,29}{10}$$

$$D = 254,07 \frac{\$}{\text{año}}$$

Los detalles de la depreciación calculada a 10 años se muestran en la Tabla 3.11:

Tabla 3.11.
Detalle de depreciación

Datos	Años	Valor anual	Valor acumulado
Activo a depreciarse	Cortadora CNC	0	-
Costo	\$2822,99	1	\$254,07
Vida útil	10 años	2	\$254,07
Valor residual	\$282,29	3	\$254,07
Depreciación anual	\$254,07	4	\$254,07
Valor depreciable	\$2540,70	5	\$254,07
		6	\$254,07
		7	\$254,07
		8	\$254,07
		9	\$254,07
		10	\$254,07
	Total		\$2540,70

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Se utilizarán los métodos del TIR, TMAR y VAN para comprobar la rentabilidad de este proyecto.

3.3. Flujo neto efectivo

La máquina construida se implementará en un emprendimiento con las siguientes características:

- Dos años de funcionamiento.
- Corte de productos de poliestireno expandido de forma manual.
- Oferta limitada de productos.
- Los clientes que realizan compras regulares son fijos.

El costo unitario de los productos de poliestireno expandido que se comercializa se pueden observar en la Tabla 3.12:

Tabla 3.12.

Precio unitario de productos comercializados actualmente

Producto	Precio Unitario USD
Sellos para losa colaborante	0,14
Casetones	3,00

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Los clientes que adquieren estos productos manejan un cronograma de pedidos de acuerdo a sus proyecciones, por lo que se empleará el cronograma para este año para estimar los ingresos mensuales y el ingreso anual, como se observa en la Tabla 3.13:

Tabla 3.13.

Ingresos estimados mensuales 2018

Mes	Pedido de sellos	Subtotal 1	Pedido de casetones	Subtotal 2	Total mensual
1	5000	700,00	200	600,00	1300,00
2	5000	700,00	200	600,00	1300,00
3	5000	700,00	250	750,00	1450,00
4	5000	700,00	250	750,00	1450,00
5	7000	980,00	250	750,00	1730,00
6	7000	980,00	250	750,00	1730,00
7	5000	700,00	200	600,00	1300,00
8	5000	700,00	200	600,00	1300,00
9	5000	700,00	300	900,00	1600,00
10	7000	980,00	200	600,00	1580,00
11	0	0	200	600,00	600,00
12	0	0	200	600,00	600,00
				Promedio	1328,33
				Total anual	15940,00

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

A continuación se detalla los costos fijos, costos variables y los egresos estimados en las Tablas 3.14, 3.15 y 3.16 respectivamente.

Tabla 3.14.

Costos fijos

Costos	Valor
Transporte de pedidos	65,00
Servicios básicos	55,00
Embalajes	25,00
Asistencia contable	25,00
Total mensual	170,00
Total anual	2040,00

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Tabla 3.15.
Costos variables

Mes	Costo materia prima total	Costo mano de obra total	Subtotal mensual
1	810,00	121,50	931,50
2	810,00	121,50	931,50
3	907,50	136,13	1043,63
4	907,50	136,13	1043,63
5	1075,50	161,33	1236,83
6	1075,50	161,33	1236,83
7	810,00	121,50	931,50
8	810,00	121,50	931,50
9	1005,00	150,75	1155,75
10	978,00	146,70	1124,70
11	390,00	58,50	448,50
12	390,00	58,50	448,50
Total anual			11464,35

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Nota: El costo de mano de obra empleada representa el 15% del costo de la materia prima.

Tabla 3.16.
Egresos estimados 2018

Mes	Costo fijo	Costo variable	Subtotal mensual
1	170,00	931,50	1101,50
2	170,00	931,50	1101,50
3	170,00	1043,63	1213,63
4	170,00	1043,63	1213,63
5	170,00	1236,83	1406,83
6	170,00	1236,83	1406,83
7	170,00	931,50	1101,50
8	170,00	931,50	1101,50
9	170,00	1155,75	1325,75
10	170,00	1124,70	1294,70
11	170,00	448,50	618,50
12	170,00	448,50	618,50
Promedio			1125,36
Total anual			13504,37

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Con los ingresos mensuales y anuales, se restan los costos fijos y variables como egresos junto al valor de la depreciación anual y se obtiene el flujo neto de efectivo anual como se puede observar en la Tabla 3.17.

Debido a que la máquina construida se implementará en el año 1, se espera tener un incremento de ingresos del 5% anual desde el año 2 impulsados por el desarrollo de

nuevos productos hasta el año 10. Para el mismo período se espera un incremento de los egresos en un 3,5% anual.

Tabla 3.17.
Flujo neto de efectivo

Año	Proyección de ingresos		Proyección de egresos		Depreciación anual	Flujo neto de efectivo anual
	Ingreso mensual	Ingreso anual	Egreso mensual	Egreso anual		
0	-	-	-	-	-	-\$2822,99
1	1328,33	15939,96	1125,36	13504,32	254,07	2181,57
2	1328,33	15939,96	1125,36	13504,32	254,07	2181,57
3	1394,75	16736,96	1170,37	14044,49	254,07	2438,40
4	1464,48	17573,81	1217,19	14606,27	254,07	2713,46
5	1537,71	18452,50	1265,88	15190,52	254,07	3007,90
6	1614,59	19375,12	1316,51	15798,14	254,07	3322,91
7	1695,32	20343,88	1369,17	16430,07	254,07	3659,74
8	1780,09	21361,07	1423,94	17087,27	254,07	4019,73
9	1869,09	22429,12	1480,90	17770,76	254,07	4404,29
10	1962,55	23550,58	1540,13	18481,59	254,07	4814,92

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

3.4. Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR)

Corresponde a la tasa mínima de ganancia sobre la inversión propuesta [51].

Se define con la ecuación (37):

$$TMAR = i + f + i * f \quad (37)$$

Donde:

i: premio al riesgo

f: inflación

El banco central de cada país pronostica el índice inflacionario para los próximos cinco años como un promedio. El premio al riesgo es la tasa de crecimiento real de la inversión con valores que oscilan entre 10% y 15% [51].

El Banco Central del Ecuador no emite un pronóstico del índice inflacionario para los próximos cinco años, por lo que se emplea el promedio de los índices de los últimos cinco años como se puede observar en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18.
Valores de inflación anual

INFLACIÓN ANUAL	
2011	5,41%
2012	4,16%
2013	2,70%
2014	3,67%
2015	3,38%
2016	1,12%
Promedio	3,41%

Nota: Valor de inflación de los últimos 5 años.

Fuente: (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos).

Como premio de riesgo se toma un 10%. En ese sentido se tiene que:

$$TMAR = 0,0341 + 0,1 + (0,0341 * 0,1)$$

$$TMAR = 13,75\%$$

Debido a que este proyecto es financiado de manera igual por los dos autores, en un porcentaje de 50% cada uno, el TMAR es el mismo para cada uno.

3.5. Valor actual neto (VAN)

Consiste en encontrar la diferencia entre los valores actualizados de los ingresos y los egresos con una tasa de rendimiento mínimo aceptable [52].

La expresión del VAN está dada por la ecuación (38) [51]:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Vt}{(1+k)^t} - I_0 \quad (38)$$

Donde:

Vt : flujos de caja en cada periodo t

I_0 : desembolso inicial

n : períodos.

El valor de VAN se evalúa mediante los siguientes criterios [53]:

$VAN > 0$ La inversión es rentable, se puede tener ganancia con una tasa mayor al TMAR.

VAN = 0 La inversión es indiferente, la ganancia corresponde sólo al TMAR

VAN < 0 La inversión no es rentable, el proyecto genera pérdidas.

3.6. Tasa interna de retorno (TIR)

Es la tasa de descuento que hace que los valores actuales de ingresos y egresos sean iguales [54].

El valor de TIR se evalúa mediante los siguientes criterios [53]:

TIR > *i* La inversión es rentable.

TIR = *i* La inversión es indiferente.

TIR < *i* La inversión no es rentable, el proyecto genera pérdidas.

En este caso *i* corresponde a la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR).

Se calcula mediante la ecuación (39) [51]:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{v_t}{(1+TIR)^t} - I_0 = 0 \quad (39)$$

Donde:

V_t: flujos de caja en cada periodo t

I₀: desembolso inicial

n: periodos

Como se puede observar en la Tabla 3.19, los resultados obtenidos de VAN > 0 y TIR > 13,75% permiten establecer que el proyecto es rentable.

Tabla 3.19.
Valor actual neto y Tasa interna de retorno

Año	Ingresos		Egresos		Depreciación anual	Flujo neto de efectivo anual
	Ingreso mensual	Ingreso anual	Egreso mensual	Egreso anual		
0	-	-	-	-	-	-\$2822,99
1	1328,33	15939,96	1125,36	13504,32	254,07	2181,57
2	1328,33	15939,96	1125,36	13504,32	254,07	2181,57
3	1394,75	16736,96	1170,37	14044,49	254,07	2438,40

4	1464,48	17573,81	1217,19	14606,27	254,07	2713,46
5	1537,71	18452,50	1265,88	15190,52	254,07	3007,90
6	1614,59	19375,12	1316,51	15798,14	254,07	3322,91
7	1695,32	20343,88	1369,17	16430,07	254,07	3659,74
8	1780,09	21361,07	1423,94	17087,27	254,07	4019,73
9	1869,09	22429,12	1480,90	17770,76	254,07	4404,29
10	1962,55	23550,58	1540,13	18481,59	254,07	4814,92
					VAN	12800,13
					TIR	83%

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

3.7. Tiempo de recuperación de la inversión (PRI)

Consiste en establecer el número de periodos requeridos para recuperar los fondos invertidos [55]. En la Tabla 3.20 se muestra los flujos netos y acumulados de efectivo del proyecto. Para calcular un flujo acumulado, al valor acumulado del año anterior se suma el flujo neto actual.

El periodo de retorno de inversión se calcula mediante la ecuación (40):

$$PRI = A + \left[\frac{|B|}{C} \right] \quad (40)$$

Donde

A: Último período con flujo negativo

B: Último flujo acumulado negativo

C: Siguiete valor de flujo de caja

Tabla 3.20.
Flujo neto y flujo acumulado del proyecto

Flujo neto de efectivo anual	Flujo Acumulado	Año
-2822,99	-2822,99	0
2181,57	-641,42	1
2181,57	1540,15	2
2438,40	3978,55	3
2713,46	6692,01	4
3007,90	9699,91	5
3322,91	13022,82	6
3659,74	16682,56	7
4019,73	20702,29	8
4404,29	25106,58	9
4814,92	29921,50	10

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

$$\text{PRI} = 1 + \left[\frac{-641,42}{1540,15} \right]$$

$$\text{PRI} = 1,416 \text{ años}$$

$$\text{PRI} = 1 \text{ año y } 5 \text{ meses}$$

El resultado obtenido indica un tiempo aceptable para la recuperación de la inversión.

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se resume el proceso de construcción de los diferentes elementos diseñados en el capítulo II y se detallan los resultados obtenidos del funcionamiento mecánico y pruebas de corte.

4.1. Estructura

El proceso de construcción se inicia con el bastidor de la máquina para permitir el ensamble y montaje de los demás componentes fijos y móviles. En las Figuras 4.1 y 4.2 se pueden observar los marcos frontal, lateral y mesa de trabajo respectivamente.



Fig. 4.1. Marco frontal a la izquierda y marco lateral a la derecha. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).



Fig. 4.2. Mesa de trabajo. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

4.2. Soportes verticales y carros guía

Como se observa en la Figura 4.3 los soportes verticales van ensamblados en los carros horizontales los cuales se desplazan a través de los marcos frontales de la

estructura. En la Figura 4.4 se puede observar el montaje de uno de los carros verticales en el soporte vertical y el detalle de los rodillos.



Fig. 4.3. Carro horizontal

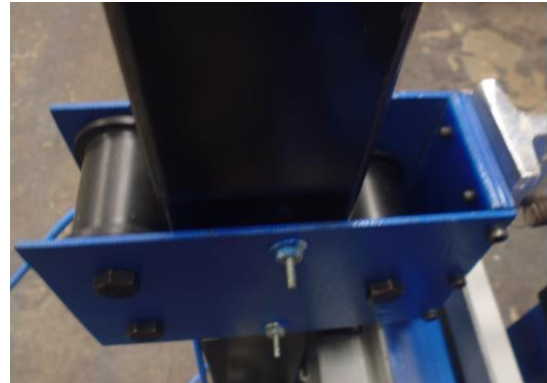


Fig. 4.4. Carro vertical.

Elaborados por: Castillo J, y Obando R (2018).

4.3. Transmisión con banda dentada

En la Figura 4.5 se puede observar el ensamble de la banda dentada de transmisión de movimiento horizontal con el piñón del motor de pasos y poleas tensoras.

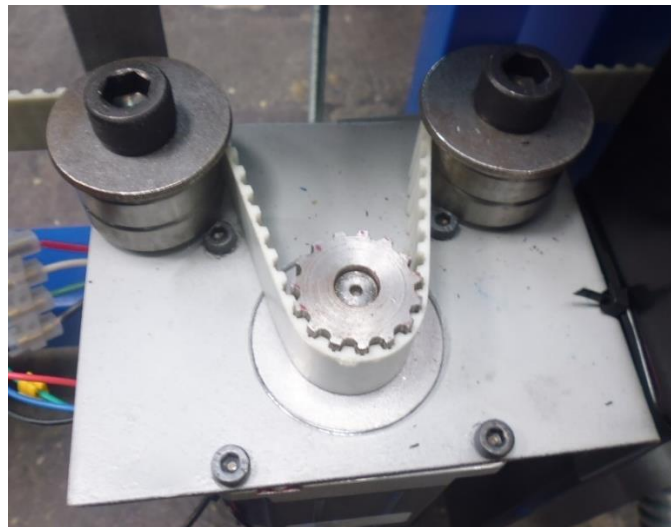


Fig. 4.5. Banda dentada en transmisión tipo omega. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

4.4. Ensamble de elementos normalizados

La construcción de la máquina se finaliza con el ensamblaje de los elementos normalizados como bandas dentadas, motores de pasos, soportes y poleas tensoras mediante diferentes tipos de pernos como se puede observar en la Figura 4.6 y se detallan en la sección de planos.



Fig. 4.6. Ensamble total de maquina CNC para corte de poliestireno expandido. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

4.5. Funcionamiento mecánico y pruebas de corte

En las pruebas de corte se determinará la velocidad y temperatura adecuada para el corte de poliestireno expandido, las cuales permitan obtener un acabado superficial liso y precisión de la forma cortada. Los fabricantes extranjeros no proporcionan velocidades de corte ni temperaturas para el corte de este material, por lo que se tomará en cuenta los resultados de pruebas de proyectos similares.

De forma más precisa, la temperatura de corte se situará en un valor igual o mayor a 100 °C que es la temperatura a la cual el poliestireno expandido empieza a fundirse de acuerdo a la ficha de propiedades de ANAPE en su página 4 [56].

Proyecto referencial 1

De acuerdo con Játiva G., Jenny L.: Collaguazo M., Klever F., pág. 115 [57] se tiene los siguientes resultados:

- Densidad del poliestireno expandido: 15kg/m³
- Velocidad de corte: 250 mm/min
- Calibre de resistencia de nicromo: 26 AWG
- Longitud del hilo de corte: 1200 mm
- Corriente empleada: 2,6 A
- Voltaje empleado: 13 Voltios

Proyecto referencial 2

De acuerdo con Macas V., Edwin M. [58], se tiene los siguientes parámetros:

- Velocidad de corte: 5,5 in/min = 139,7 mm/min
- Longitud del hilo de corte (3): 200 mm*3 = 600mm
- Corriente empleada: 2,5 A
- Voltaje empleado: 5 Voltios

Se tomará en cuenta los resultados del proyecto referencial 1 debido a que posee características más aproximadas a este proyecto. Para realizar las pruebas de corte se tienen las siguientes condiciones:

- Velocidad de corte inicial: 220 mm/min
- Corriente inicial: 1,1 A
- Longitud del hilo de corte: 2700 mm
- Calibre del hilo de corte: 26 AWG
- Tensión en los resortes: 14,7 N por resorte
- Dimensiones bloque para corte: 2500*600*300 mm
- Densidad del bloque para corte: 15 kg/m³

De forma preliminar, mediante una termocupla se determinó que temperaturas se alcanzan mediante la regulación del amperaje empleado, como se puede observar en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1.

Tabla de corriente-temperatura				
Corriente A	1.1	1.6	1.9	2.3
Temperatura °C	105	125	157	175

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 4.2 se puede observar el registro de las pruebas de corte. En función de los parámetros de corte las condiciones de operación esperadas son las siguientes:

- El hilo de corte (resistencia de nicromo) debe mantenerse tensado durante el corte.
- La vibración de los motores de pasos debe ser mínima o nula.
- El acabado superficial del corte debe ser totalmente liso o levemente rayado.

Tabla 4.2.
Pruebas de corte

Prueba	Parámetros de corte			Condiciones de operación	Nivel
	Corriente Amp	Voltaje V	Vel.corte mm/min		
1	1.1	66.6	220	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Alto
				Acabado superficial	Bajo
2	1.1	66.6	260	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Muy alto
				Acabado superficial	Bajo
3	1.1	66.6	300	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Bajo
				Acabado superficial	Bajo
4	1.9	54.9	300	Tensión en el hilo de corte	Medio
				Vibración del motor horizontal	Bajo
				Acabado superficial	Medio
5	1.9	54.9	300	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Bajo
				Acabado superficial	Medio
6	1.9	54.9	320	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Bajo
				Acabado superficial	Alto
7	1.9	54.9	340	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Muy bajo
				Acabado superficial	Alto
8	2.3	60.9	450	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Nulo
				Acabado superficial	Muy Alto
9	2.3	60.9	475	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Nulo
				Acabado superficial	Muy Alto
10	2.3	60.9	500	Tensión en el hilo de corte	Alto
				Vibración del motor horizontal	Nulo
				Acabado superficial	Muy Alto

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Figura 4.7 se pueden observar los resultados más destacables de las pruebas realizadas, en ese sentido se puede determinar que los parámetros adecuados para el corte corresponden a los utilizados en las pruebas 8, 9 y 10.

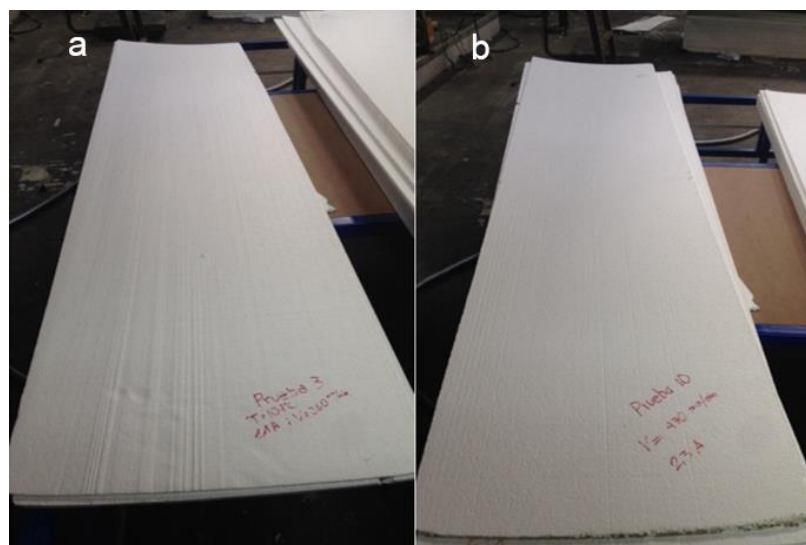


Fig. 4.7. Acabado superficial a) Prueba 3 y b) Prueba 10. Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

En la Tabla 4.3 se puede observar las condiciones del funcionamiento de los sistemas mecánicos durante las pruebas de corte.

Tabla 4.3.

Detalles de funcionamiento de los sistemas mecánicos

Sistema	Condición verificada	Nivel
Carro horizontal	Precisión de desplazamiento	Alto
	Vibración	Muy bajo
Carro vertical	Precisión de desplazamiento	Alto
	Vibración	Muy bajo
Transmisión horizontal	Elongación de banda dentada	Muy bajo
	Fuerza de pre tensado de la banda	Alto
	Vibración del motor	Nulo
Transmisión vertical	Elongación de la banda dentada	Muy bajo
	Fuerza de pre tensado de la banda	Alto
	Vibración del motor	Nulo
Bastidor	Deflexiones bajo las permisibles	-
	Rigidez mecánica	Muy alto

Elaborado por: Castillo J, y Obando R (2018).

Conclusiones

- De la evaluación realizada sobre el empleo máquinas CNC para el corte de Poliestireno en el mercado nacional se encontró que existen 5 empresas que emplean este tipo de maquinarias de origen extranjero, cuyo valor de adquisición oscila alrededor de USD 42000,00 y dimensiones estructurales de 259*145*266cm lo cual permite cortar un bloque estándar de poliestireno de 250*120*60 cm.
- Mediante matrices de decisión según criterios técnicos establecidos se comparó tres alternativas de máquinas CNC extranjeras, donde se obtuvo que la mejor opción es el modelo FrogWire con un resultado de 0,512 superior a los valores de 0,267 y 0,019 de las máquinas Plot 2500 y Cut 2910s respectivamente .
- De la alternativa extranjera seleccionada, se amplió sus dimensiones a 2,6*1,3*2,7m en el diseño a fin de favorecer las operaciones de corte y se reemplazó el sistema de guías lineales por rodillos reduciendo un 82% del costo de para la adquisición de estos elementos mecánicos.
- Del diseño de la máquina CNC se obtuvo un factor de seguridad de seguridad mínimo de 20 en sus elementos estructurales principales y secundarios, los pernos seleccionados de especificación DIN 931 con grados de 8.8 - 12.9 y las juntas de soldadura tipo filete y a tope con longitud de 15 mm y espesor de garganta de 3/16 de pulgada satisfacen la resistencia de carga actuante.
- De los componentes electromecánicos seleccionados los motores de paso de 2,4kg.cm de torque para el movimiento vertical sólo utilizan el 60 % de su capacidad. Mientras que en los motores de 30kg.cm para el movimiento horizontal se utiliza el 95%, ambos componentes fueron configurados con una resolución de 3200 pulsos/revolución para reducir ruido y vibraciones excesivas debido al desplazamiento lento de la máquina.
- Se realizó el estudio de costos de la construcción de la máquina, con un costo final de \$2822.99, empleando un 98% de materiales y componentes disponibles en el mercado local, con un tiempo de retorno de inversión de 1 año y 5 meses que se considera aceptable.
- De las pruebas de funcionamiento realizadas con corriente de 2,3 Amperios (175°C), un rango de velocidad de corte entre 450 a 500 mm/min e hilos de

corte de calibre 26 y 30 AWG se obtuvieron acabados lisos en la sección de poliestireno cortada, con cortes de 2,5 y 1 mm de ancho respectivamente para cada calibre de hilo de corte.

- Durante los cortes realizados con la maquina CNC se obtuvieron resultados satisfactorios desde el punto de vista de funcionamiento mecánico.

Recomendaciones

- Promover el diseño y construcción de máquinas CNC para el corte de poliestireno en el mercado nacional a fin de favorecer la adquisición en las empresas locales y así contribuir en desarrollo industrial del país.
- Considerar la realización de mejoras en el diseño de la máquina CNC desde el punto de vista electrónico y de control que contribuyan en la optimización del funcionamiento de la máquina.
- Implementar sistemas complementarios como una tornamesa o un torno horizontal, ampliando así las aplicaciones de corte de la máquina construida mediante una inversión moderada.
- Considerar que para aplicaciones de corte de planchas de poliestireno expandido, se puede montar un perfil T de aluminio perforado de mayor longitud con capacidad de más hilos de corte, de esta manera se mejora la productividad de la máquina.
- Realizar un estudio de diseño y desarrollo de un software específico para el corte de productos de poliestireno expandido, debido a que el software empleado es libre y apto para el control de diferentes tipos de máquinas CNC.
- Realizar un plan de mercadeo para que los propietarios de la máquina puedan aprovechar de forma adecuada la capacidad de producción de la misma y cumplir con los indicadores analizados en el estudio de costos.
- Implementar un mecanismo de sujeción que permita fijar planchas con espesor menor a 50 mm a la mesa de trabajo, debido que al ser tan delgadas no mantienen una buena estabilidad durante el corte.
- Realizar un estudio del comportamiento térmico del filamento de níquel-cromo para determinar las condiciones de mejor funcionamiento respecto al tipo de voltaje y corriente que se le aplique.

Referencias

- [1] Poliexpandidos S.A. [Online]. <http://poliex.com.ec/>
- [2] Industrias Verton. Industrias Verton. [Online]. <https://verton.ec/>
- [3] Plastex S.A. Plastex S.A. [Online]. <http://www.plastex.com.ec/>
- [4] AISLAPOL S.A. Aislantes Politérmicos AISLAPOL S.A. [Online]. http://www.aislapol.com/index_linea.html
- [5] Federación Ecuatoriana de Exportadores. Paneles y Construcciones PANECONS S.A. [Online]. <http://www.fedexpor.com/directorio/empresas-exportadoras/item/paneles-y-construcciones-panecons-sa>
- [6] CROMA Foam Processing Technologies. (2017) Machines CNC > SÉRIE PROFESSIONNELLE. [Online]. <http://www.croma-foamcutter.com/machines-de-decoupe-polystyrene-fil-chaud/machines-cnc/serie-professionnelle/>
- [7] Hotwire Systems. Alambre de nichrome. [Online]. <http://www.hotwiresystems.com/es/la-empresa-cortador-de-espuma/>
- [8] CROMA Foam Processing Technologies. Série Professionnelle. [Online]. <http://www.croma-foamcutter.com/wp-content/uploads/2017/01/S%C3%A9rie-professionnelle10-2016.pdf>
- [9] Hotwire Direct Foam Cutting Machines. CNC Foam Cutting Machines. [Online]. <http://www.hotwiredirect.com/products/cnc-foam-cutting-machines/cnc-foam-cutting-machine-8600/>
- [10] James Newell, *Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería*, Primera ed. México: Alfaomega, 2011.
- [11] BASF Plastics. Styropor. Informaciones Técnicas. [Online]. <http://www.construnario.com/ebooks/127/styropor/files/styropor.pdf>
- [12] Polinorte. EPS Poliestireno Expandido-Telgopor. [Online].

<http://www.polinorte.com/eps/>

- [13] STYROTECH.INC. Packaging, Display & OEM Products. [Online].
<http://www.styrotech.com/products/oem>
- [14] Alloy Wire International. 80/20 Ni Cr Resistance Wire. [Online].
<http://www.alloywire.com/products/8020-ni-cr-nickel-chrome-resistance-wire/>
- [15] HeatersPlus. Nichrome and Kanthal Resistance Heating Wire. [Online].
<https://www.heatersplus.com/wire.html>
- [16] Andrés García Higuera and Francisco J Castillo García, *CIM: El computador en la automatización de la producción*. Cuenca, Ecuador: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2007.
- [17] Nettuno Sistemi. Model PLOT 250 - Pantograph cutters - vSQR series BOX. [Online]. <http://www.nettunosistemi.it/plot250.php>
- [18] cnc multitool GmbH. CUT 2900S - 2D series. [Online]. <http://www.cnc-multitool.com/cnc/foam-cutting-machine/multiwire/craft/cut2900S.html>
- [19] Streamline Automation. Frogwire. [Online].
http://cdn2.hubspot.net/hubfs/476489/FROGWire_2016.pdf?t=1455660416561&submissionGuid=5a514e1b-5cb9-414a-a168-5f0f515713a4
- [20] José Francisco Vilar Barrio, Fermín Gómez Fraile, and Miguel Tejero Monzón, *Las 7 nuevas herramientas para la mejora de la calidad.*, Segunda ed. Colombia: Ed. Fundación Confemetal, 2004.
- [21] Appold, Hans, Kurt Feiler, Alfred Reinhard, and Paul Schmidt, *Tecnología de los metales para profesiones técnico-mecánicas*. Barcelona: Reverté, 2005.
- [22] Megadyne. Megalinear. [Online].
<http://www.megadynegroup.com/es/products/megalinear/megalinear>
- [23] Juan Ángel Garza, *Sistemas digitales y electrónica digital, prácticas de laboratorio*. México: Pearson Education, 2006.

- [24] Electan. Motor paso a paso NEMA 23. [Online]. <http://www.electan.com/motor-paso-paso-nema-p-3299.html>
- [25] Thomson Linear Motion. Guías de riel de perfil. [Online]. https://www.thomsonlinear.com/website/esm/esm/products/linear_guides/profiler_ail.php
- [26] www.cientificosaficionados.com. Fresadora CNC con materiales de cerrajería. [Online]. <http://www.cientificosaficionados.com/foros/viewtopic.php?f=4&t=8232&start=10>
- [27] Andon Equipos Industriales. Perfiles estructurales de aluminio. [Online]. http://www.andon.pt/index.php?main_page=index&cPath=1319_218_219_223_261
- [28] IPAC. Tubería estructural rectangular. [Online]. <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=10>
- [29] Jack C. McCormac and Stephen F. Csenark, *Diseño de estructuras de acero*. México: Alfaomega, 2012.
- [30] Óscar M. Gonzáles Cuevas, *Análisis estructural*.: Limusa, 2002.
- [31] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Octava ed. México: McGraw Hill, 2008.
- [32] Diego Aranda, *Electrónica: Plataformas Arduino y Raspberry Pi*. Buenos Aires: Fox Andina, 2014.
- [33] SunFounder. 3D CNC kit for arduino CNC Shield V3. [Online]. <https://www.sunfounder.com/a4988-driver-board-kit.html>
- [34] DIPAC. Tubo estructural rectangular. [Online]. <http://www.dipacmanta.com/tubos/tubo-estructural-rectangular-negro>
- [35] AISC, *Manual of Steel Construction*, Octava ed. Chicago, 1986.

- [36] DIPAC. Ángulo importado. [Online].
<http://www.dipacmanta.com/perfiles/angulo-importado>
- [37] Robert L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, Cuarta ed. México: Pearson Education, 2006.
- [38] IVAN BOHMAN C.A. IBCA. Catálogo de productos III Edición. [Online].
www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/01/catalogo-general-IBCA.pdf
- [39] ASTM. Norma ASTM A36. [Online].
https://www.academia.edu/21675528/Norma_ASTM_A36
- [40] SKF. Rolling bearings. [Online]. http://www.skf.com/binary/89-121486/10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf
- [41] SKF. SKF Bearing Calculator. [Online].
<http://webtools3.skf.com/BearingCalc/selectProduct.action>
- [42] AutomationDirect. (2007) Sistema de motores paso a paso Sure Step. [Online].
<https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.html>
- [43] Sanmetal S.A. Termoplásticos. [Online].
<http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/nylon-poliamida-6/9>
- [44] DIPAC. Tubo estructural cuadrado. [Online].
<http://www.dipacmanta.com/tubos/tubo-estructural-cuadrado-negro>
- [45] Novopan Ecuador. Paneles MDP Novopan. [Online].
<http://www.novopan.com.ec/>
- [46] CEDAL. Perfilera de aluminio tipo T. [Online].
<http://www.cedal.com.ec/uploads/product/12-cedal-tees.pdf>
- [47] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Cuarta ed. México: Pearson Education, 2002.

- [48] Mercado Libre. Dimmer Regulador Ac Resistencias 25a Potenciómetro. [Online]. <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-414133601-dimmer-regulador-ac-resistencias-25a-potenciómetro- JM>
- [49] Eva Raquel Solorio Sánchez and M.A y C.P., *Contabilidad Financiera.*: Palibrio, 2012.
- [50] Servicio de Rentas Internas SRI. (2017) Servicio de Rentas Internas SRI. [Online]. <http://www.sri.gob.ec/web/guest/depreciacion-acelarada-de-activos-fijos>
- [51] G. Baca Urbina, *Evaluación de proyectos*. México: McGraw-Hill, 2001.
- [52] Francisco Jiménez Boulanger, Carlos Luis Espinoza Gutiérrez, and Leonel Fonseca Retana, *Ingeniería económica*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.
- [53] CreceNegocios. El VAN y el TIR. [Online]. <https://www.crecenegocios.com/el-van-y-el-tir/>
- [54] Saúl Espinoza Fernández, *Los proyectos de inversión: evaluación financiera.*: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [55] Diana Mondino and Eugenio Pendás, *Finanzas para empresas competitivas*. Buenos Aires: Ediciones Granica SA, 2007.
- [56] ANAPE. Propiedades del EPS. [Online]. <http://www.anape.es/pdf/ficha73.pdf>
- [57] Jenny Lucía Játiva Gavilánez and Klever Fernando Collaguazo Manotoa. (2015, Junio) Diseño y construcción de una máquina para cortar poliestireno expandido con motores de paso controlados con un PLC. [Online]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10229>
- [58] Edwin Marcelo Macas Valdez. (2007, Julio) Dimensionamiento y construcción de una máquina prototipo para laminado y corte de bloques de poliestireno expandido de dimensiones 300x200x50. [Online].

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1754>

[59] ASTM. Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes. [Online]. www.astm.org

ANEXOS

ANEXO 1

Especificaciones técnicas de la máquina extranjera para base del diseño

SPECIFICATIONS

	METRIC	STANDARD
Overall Length	2997 mm	118"
Overall Width	2591 mm	102"
Table Height	1956 mm	77"
Process Area Length	2515 mm	99"
Process Area Width	2464 mm	97"
Process Area Height	1321 mm	52"
Total Weight	340 Kg	750 lbs
Maximum Cutting Speed	50 mm/s	120 IPM
Maximum Rapid Traverse Speed	1185 mm/s	2800 IPM
Accuracy	0.025mm	0.001"
Repeatability	+/- 0.05 mm	+/- 0.002"
Motors	Stepper Motors Direct Drive	
Motion	Pinion and steel reinforced drive belts on all axes	
Network	TCP/IP, 10Base2 or 10BaseT	

Fuente: Streamline Automation [19].

ANEXO 2

Especificaciones técnicas del alambre de resistencia de níquel-cromo 80/20

Chemical Composition			Designations	Typical Applications
Element	Min %	Max %	W.Nr. 2.4869 UNS N06003 AWS 180	Heating elements in both domestic and industrial appliances and in control resistors
C	-	0.15		
Si	0.50	2.00		
Mn	-	1.00		
P	-	0.02		
S	-	0.015		
Cr	19.00	21.00		
Ni	75.00	-		
Al	-	0.30		
Cu	-	0.50		
Fe	-	1.00		

Density	8.31 g/cm ³	0.300 lb/in ³
Electrical Resistivity at 20 °C	108 microhm • cm	650 ohm • Circ • mil/ft
Maximum Operating Temperature		
For use as a Heating Element	1200 °C	2200 °F
For use in Hot Cutting, Fabrication – Line Bending	300 °C	572 °F
Melting Point	1400 °C	2550 °F
Coefficient of Expansion	12.5 µm/m °C (20 – 100 °C)	7.0 x 10 ⁻⁶ in/in °F (70 – 212 °F)

Fuente: Alloy Wire International [14].

ANEXO 3

Propiedades mecánicas mínimas de tubería estructural ASTM-A500

Round Structural Tubing				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Tensile strength, min, psi [MPa]	45 000 [310]	58 000 [400]	62 000 [425]	58 000 [400]
Yield strength, min, psi [MPa]	33 000 [230]	42 000 [290]	46 000 [315]	36 000 [250]
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^D	25 ^A	23 ^B	21 ^C	23 ^B
Shaped Structural Tubing				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Tensile strength, min, psi [MPa]	45 000 [310]	58 000 [400]	62 000 [425]	58 000 [400]
Yield strength, min, psi [MPa]	39 000 [270]	46 000 [315]	50 000 [345]	36 000 [250]
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^D	25 ^A	23 ^B	21 ^C	23 ^B

Fuente: ASTM [59].

ANEXO 4

Especificaciones motores paso a paso.

Especificaciones del motor paso a paso <i>SureStep™</i>				
Números de artículo	STP-MTR-17048	STP-MTR-23055	STP-MTR-23079	STP-MTR-34066
Flanje del Motor	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 34
Torque de eje detenido máximo	0,59 N-m	1,29 N-m	2,08 N-m	3,06 N-m
	83 onzas-pulgada	166 onzas-pulgada	276 onzas-pulgada	434 onzas-pulgada
	5,2 libras-pulgada	11,4 libras-pulgada	18,4 libras-pulgada	27,1 libras-pulgada
Inertía del rotor	0,0000068 kg-m ²	0,000027 kg-m ²	0,000047 kg-m ²	0,00014 kg-m ²
	0,45 oz-in ²	1,483 oz-in ²	2,596 oz-in ²	7,66 oz-in ²
	0,00006 lb-in-s ²	0,00024 lb-in-s ²	0,00042 lb-in-s ²	0,0012 lb-in-s ²
Corriente nominal	2,0 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase
Angulo del paso básico	1,8° (motores bifásicos con cable con conector)			
Peso	210 gramos 0,7 lbs	457 gramos 1,50 lbs	1 Kg 2,2 lbs	1,17 Kg 3,85 lbs
Tolerancia del eje	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Juego radial del eje @ fuerza de 1 libra	0,0254 mm o 0,001 pulgadas máximas			
Perpendicularidad	0,0762 mm o 0,003 pulgadas			
Concentricidad	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C (La temperatura externa del motor debe mantenerse abajo de 100 °C (212 °F))			
Fuerza máxima radial	1,82 Kg o 6 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	11,89 Kg o 39 lbs
Fuerza máxima axial	1,82 Kg o 6 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	7,62 Kg o 25 lbs
Clase de aislación	Clase B 130 °C			
Aprobación de Agencia	CE (cumple con EN55014-1 (1993) y EN60034-1.5.11)			
Cable de extensión (motor al acclonamiento)	6 metros o 20 pies - Número de artículo STP-EXT-020			

Fuente: AutomationDirect [42].