



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE MECANISMOS Y SIMULACIÓN DEL CONTROL
AUTOMÁTICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO Y
DESPLAZAMIENTO EN 3 DIMENSIONES DE LA HERRAMIENTA
EN UNA MÁQUINA CNC.”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

JIMÉNEZ CÓRDOVA DARWIN RAÚL
darwin.jimenez@epn.edu.ec
PÁEZ ESTRELLA MARCO VINICIO
marco.paez@epn.edu.ec

DIRECTOR:
Ing. BRAVO P. GABRIEL, M.Sc.
gabriel.bravo@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR:
Ing. AGUINAGA ÁLVARO GONZALO, PhD.
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

Quito, Julio 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Darwin Raúl Jiménez Córdova y Marco Vinicio Páez Estrella**, bajo mi supervisión.

Ing. Gabriel Bravo, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Álvaro Aguinaga, PhD.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Darwin Raúl Jiménez Córdoba y Marco Vinicio Páez Estrella**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Darwin Raúl Jiménez Córdoba

Marco Vinicio Páez Estrella

DEDICATORIA

A mis padres Clarita y Darwin por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Ustedes siempre me apoyan y motivan constantemente para alcanzar mis metas.

Darwin

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a mi familia, ya que con su incondicional apoyo he podido lograr cada uno de mis objetivos en mi vida. Incluyendo el plasmado en el presente documento, el título de Ingeniero Mecánico.

Marco Páez

AGRADECIMIENTO

Al concluir este trabajo de titulación es necesario brindar un reconocimiento y el agradecimiento más profundo a:

A mis padres Darwin y Clarita por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mis hermanos Sofía y Daniel por cuidarme, aconsejarme y soportarme siempre.

Al resto de mi familia por su amor incondicional.

Al Ing. Bravo y al Dr. Aguinaga no solo por brindarme sus conocimientos sino también por todos sus consejos.

A mis amigos de la universidad por hacer de la universidad una experiencia agradable y divertida.

A mis amigos de toda la vida por siempre estar cuando los necesito.

Al Ing. Tapia del laboratorio de automatización por ayudarnos con el prototipo.

A mi compañero de tesis Marco por la amistad, tiempo y éxitos compartidos.

Darwin

AGRADECIMIENTO

A mi madre, Patricia Estrella, quien supo velar por mi bienestar cada día de mi vida universitaria y que con su cariño me apoyó en los momentos donde me encontraba falto de fuerzas. Te agradezco mami por ser un oído a quien contar las anécdotas en el día a día de esta etapa universitaria.

A mi padre, Marco Páez, por ser siempre un ejemplo a seguir en mi vida y fuente de inspiración para continuar buscando metas cada vez más altas y tener la confianza de poder lograrlas. Te agradezco padre y más que nada espero llenarte de orgullo.

A mi abuelita y tía, jamás podría olvidarme de mis otras mamás. Agradezco a mi abuelita por ser el ser más querido en mi corazón, cuyo amor y enseñanzas me permitieron llegar al lugar que estoy. ¡Muchas gracias tía Olga! Porque con su cariño hacia mí, se ha convertido una madre más, siempre apoyándome con deliciosas colaciones hechas con amor para salir a clases.

Agradecimiento especial a cada amigo y amiga conocido en la universidad que de una u otra manera me formaron una parte de mi carácter. Amigos y amigas fueron la parte alegre y divertida de la universidad e hicieron de esta un lugar donde sentirse a gusto bajo su compañía. Para nombrarlos y agradecerles de uno en uno, hace falta otro documento, solo puedo decir. ¡Gracias por regalarme alegrías!

Un agradecimiento especial a personas que sin la obligación de hacerlo, prestaron gran ayuda en este trabajo. Al Ing. Christian Tapia quien ante inconvenientes compartió su conocimiento y ayudó a investigar soluciones; más que un profesor fue un amigo en la realización de este trabajo. A Eduardo Centeno, dueño de COBE Ecuador, un gran amigo que ayudó con los servicios de su compañía para la realización de la tesis y supo asesorar a sus realizadores.

Finalmente se agradece al director y co-director del presente trabajo de titulación. Su aporte a la formación profesional ha sido excelente. Al Ing. Gabriel Bravo se agradece por su gran apoyo y paciencia durante este proceso. Sus recomendaciones y retos planteados han ayudado solamente a mejorar.

Marco Páez

Índice de contenido

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
Índice de contenido	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas.....	xvii
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Generalidades de máquinas CNC.....	3
1.2.1. Tipos de máquinas CNC	3
1.2.1.1. Por tipo de movimiento.	3
1.2.1.2. Por tipo de control.....	4
1.2.1.3. Por número de ejes.....	5
1.3. Tipo de Motores utilizados en máquinas CNC.....	6
1.3.1. Motores de Pasos	6
1.3.2. Servomotores.....	8
2. METODOLOGÍA	11
2.1. Análisis funcional	11
2.1.1. Fundamentos del análisis funcional	11
2.1.2. Diagramas funcionales.....	11
2.1.2.1. Nivel 0.....	11

2.1.2.2.	Nivel 1.....	11
2.1.2.3.	Nivel 2.....	12
2.2.	Determinación de especificaciones	13
2.2.1.	Consideraciones	13
2.2.2.	Casa de la calidad.....	13
2.2.2.1.	Voz del Usuario.....	13
2.2.2.2.	Análisis de la competencia – Benchmarking	14
2.2.2.2.1.	Industria nacional.....	14
2.2.2.2.2.	Industria internacional	15
2.2.2.2.3.	Importadoras Nacionales	18
2.2.2.2.4.	Resultados del Benchmarking.....	21
2.2.2.3.	Voz del ingeniero	22
2.2.2.4.	Correlaciones.....	23
2.2.2.5.	Evaluación Técnica	24
2.2.2.6.	Compromisos técnicos.....	24
2.2.3.	Resultados – Casa de la Calidad	25
2.3.	Solución para cada módulo.....	27
2.3.1.	Módulo 1: Sujeción.....	27
2.3.1.1.	Sujeción de la herramienta de corte.....	27
2.3.1.2.	Mesa de trabajo	28
2.3.1.3.	Sujeción de la pieza a la mesa de trabajo	29
2.3.1.3.1.	Tornillos, tuercas y bridas de apriete.....	29
2.3.1.3.2.	Mandril de mordazas.....	30
2.3.1.3.3.	Mordazas de apriete	31
2.3.2.	Módulo 2: Control.....	35
2.3.3.	Módulo 3: Guía de movimiento.....	36
2.3.3.1.	Guía de eje circular liso con rodamientos lineales.....	36
2.3.3.2.	Guía prismática y acople prismático.....	37
2.3.3.3.	Guía de tubo cuadrado o perfil U con ruedas y rodamientos radiales... 38	38

2.3.4.	Módulo 4: Transmisión de movimiento	41
2.3.4.1.	Piñón cremallera	41
2.3.4.2.	Tornillo de potencia.....	41
2.3.4.3.	Transmisión por bandas dentadas	43
2.3.5.	Diagrama morfológico	46
2.3.6.	Prototipo seleccionado.....	47
2.4.	Diseño mecánico	49
2.4.1.	Requerimientos limitadores.....	49
2.4.2.	Funciones críticas	50
2.4.3.	Parámetros críticos	50
2.4.3.1.	Módulo 1	50
2.4.3.2.	Módulo 2	50
2.4.3.3.	Módulo 3	50
2.4.3.4.	Módulo 4	51
2.4.4.	Condiciones críticas.....	51
2.4.5.	Cálculo de condiciones críticas	52
2.4.5.1.	Módulo 1	52
2.4.5.1.1.	Operación de mecanizado	52
2.4.5.1.2.	Potencia de mecanizado	52
2.4.5.1.3.	Tornillos para sujetar el husillo:	58
2.4.5.1.4.	Estructura de soporte.....	59
2.4.5.2.	Módulo 3	61
2.4.5.2.1.	Fuerza de corte.....	62
2.4.5.2.3.	Sección transversal de las guías verticales	67
2.4.5.2.4.	Fuerzas que actúan sobre rodamientos usados para guiar el movimiento en eje X e Y	74
2.4.5.2.5.	Carga dinámica que actúa sobre los rodamientos.....	76
2.4.5.3.	Módulo 4	77
2.4.5.3.1.	Selección de husillo de bolas según THK	77

2.4.5.3.2.	Torque máximo y torque efectivo de servomotores	92
2.5.	Evaluación de parámetros.....	98
2.5.1.	Módulo 1	98
2.5.1.1.	Estructura de soporte.....	98
2.5.2.	Módulo 3	102
2.5.2.1.	Ejes Guías	102
2.5.2.1.1.	Eje Z.	102
2.5.2.1.2.	Eje X.....	105
2.5.2.1.3.	Eje Y.....	108
2.5.2.1.3.1.	Resultados – Dimensiones de ejes guías.....	111
2.5.2.2.	Rodamientos de bolas para eje X e Y.	111
2.5.2.3.	Rodamientos lineales para el eje Z	113
2.5.3.	Módulo 4	113
2.5.3.1.	Evaluación de Husillo de bolas	113
2.5.3.2.	Servomotores.....	115
2.6.	Diseño de control automático.....	115
2.6.1.	Diseño preliminar del control automático.....	115
2.6.1.1.	Requerimientos limitadores.....	116
2.6.1.2.	Funciones críticas	116
2.6.1.3.	Parámetros críticos	116
2.6.1.4.	Condiciones críticas.....	117
2.6.1.5.	Establecimiento de las condiciones críticas	117
2.6.1.5.1.	Entradas del PLC.....	119
2.6.1.5.2.	Salidas del PLC	120
2.6.1.5.3.	Especificaciones del PLC.....	121
2.6.1.5.4.	Especificaciones de elementos de entrada	122
2.6.1.5.5.	Especificaciones de elementos de salida	127
2.6.2.	Diseño definitivo del control automático	131
2.6.2.1.	Secuencia de las operaciones de control.....	131

2.6.2.2.	Programación de PLC.....	132
2.6.2.2.1.	Lenguaje de programación.....	133
2.6.2.2.2.	Comentarios del programa ladder	135
2.7.	Simulación	154
2.7.1.	Software simulación.....	154
2.7.2.	Simulación en curso.....	155
2.7.2.2.	Control principal	155
2.7.2.3.	Señalización y seguridad	157
2.7.2.4.	Panel de control	159
2.8.	Presupuesto.....	161
2.8.1.	Costo de Materiales	161
2.8.2.	Costo de Mano de Obra (Fabricación)	161
2.8.3.	Costo de elementos Normalizados.....	163
2.8.4.	Costo de elementos de Control Automático	164
2.8.5.	Costos Indirectos	165
2.8.6.	Presupuesto Total de la Máquina.....	165
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	166
3.1.	Resultados.....	166
3.1.1.	Planos de taller y conjunto	166
3.1.2.	Simulación y programación de PLC S7-200.....	166
3.1.3.	Análisis de costos.	167
3.1.4.	Prototipo construido.	168
3.1.4.1.	Parte mecánica.	168
3.1.4.2.	Diseño del control automático	170
3.1.4.3.	HMI	173
3.1.5.	Protocolo de Pruebas.....	174
3.1.5.1.	Nombre del Proceso: Prueba N°1	174
3.1.5.2.	Nombre del Proceso: Prueba N°2	176
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	178

4.1.	Conclusiones	178
4.2.	Recomendaciones	179
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
	ANEXOS	185
ANEXO I.	Casa de la calidad.....	185
ANEXO II.	Factores de alimentación, C, para constantes de poder.....	186
ANEXO III.	Propiedades típicas de materiales usados en Ingeniería (Unidades internacionales).....	187
ANEXO IV.	Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD).	188
ANEXO V.	Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin	189
ANEXO VI.	Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero	190
ANEXO VII.	Factores de confiabilidad ke correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga.....	191
ANEXO VIII.	Valores típicos de factores de seguridad basados en cálculos de esfuerzo.	192
ANEXO IX.	Tabla de esfuerzo de Von-Mises, factor de seguridad y deflexión permisibles en un motor de vapor.	193
ANEXO X.	Precisión del ángulo de paso	194
ANEXO XI.	Diámetro de eje husillo en función de Longitud y paso.....	195
ANEXO XII.	Posibles modelos de husillo de bolas tipo BTK	196
ANEXO XIII.	Velocidad de rotación admisible determinada por el valor DN.....	197
ANEXO XIV.	Vida útil específica para diferentes tipos de máquinas	198
ANEXO XV.	Simulación estática de estructura de soporte.	199
ANEXO XVI.	Programa realizado en PLC MicroLogix 1100 de Allen-Bradley	210
ANEXO XVII.	Planos de conjunto y taller.	216

Índice de figuras

Figura 1.1. Sistema Punto a Punto.	3
Figura 1.2. Sistema de contorno.	3
Figura 1.3. Sistema en lazo abierto.....	4
Figura 1.4. Control en lazo cerrado.....	4
Figura 1.5. Ejes de movimiento de máquinas de 5 ejes.	5
Figura 1.6. Motor paso a paso Bipolar Nema 17.....	6
Figura 1.7. Formas constructivas de aumentar resolución de motores paso a paso.	7
Figura 1.8. Motor paso a paso Bipolar.....	7
Figura 1.9. Servomotores tipo Brushless.	9
Figura 1.10. Principio físico de un encoder óptico.....	9
Figura 1.11. Disco codificado de un encoder para controlar el sentido de giro.....	10
Figura 2.1. Nivel 0 del análisis funcional.....	11
Figura 2.2. Nivel 1 del análisis funcional.....	12
Figura 2.3. Nivel 2 del análisis funcional.....	12
Figura 2.4. Router CNC de la empresa SupraCNC.....	15
Figura 2.5. Centro de Mecanizado ROMI D800.	16
Figura 2.6. Centro de prototipado rápido Roland MDX-40a.....	17
Figura 2.7. Centro de mecanizado VCM3-M400 de la empresa VIWA.....	18
Figura 2.8. Centro de mecanizado TRAVIS CNC MM-4.....	19
Figura 2.9. Centro de Mecanizado VF-2 de HAAS.....	20
Figura 2.10. Centro de mecanizado XK 7145A de la empresa GSK.	21
Figura 2.11. Modelo CAD de un husillo de corte.....	28
Figura 2.12. CAD de Mesa de trabajo con canales tipo T.	28
Figura 2.13. Tornillos, tuercas y bridas de apriete.....	29
Figura 2.14. Formas correcta e incorrecta de sujeción por tornillos, tuercas y bridas de apriete.	30
Figura 2.15. Mandril de mordazas.....	30
Figura 2.16. CAD Mordazas de apriete.....	31
Figura 2.17. Guía de eje circular liso con rodamientos lineales.....	36
Figura 2.18. Guía prismática y acople prismático.....	37
Figura 2.19. Guía Tubo cuadrado o perfil U con ruedas y rodamientos radiales.....	38
Figura 2.20. Mecanismo Piñón Cremallera.....	41
Figura 2.21. Tornillo de Potencia Rosca ACME.....	41
Figura 2.22. Eficacia de transmisión de potencia entre husillo de bolas vs husillo ACME.....	42

Figura 2.23. Banda dentada.....	43
Figura 2.24. Prototipo seleccionado. a) Perspectiva isométrica, b) Vista frontal y c) Perspectiva isométrica trasera	47
Figura 2.25. Identificación de módulos de guía y transmisión de movimiento en ejes X (a), Y (b) y Z(c) respectivamente.....	48
Figura 2.26. CAD preliminar de la solución del módulo de guía de movimiento.	48
Figura 2.27. CAD preliminar de la solución del módulo de transmisión de movimiento.....	49
Figura 2.28. Proceso de selección de motor de husillo CNC.....	52
Figura 2.29. Herramienta de Planeado Coromil 415	53
Figura 2.30. Plaquita 415N-05 02 06M-M30 1040.....	53
Figura 2.31. Husillo CNC ER20, enfriado por aire.....	57
Figura 2.32. Tornillos que sujetan al husillo a la placa base.....	58
Figura 2.33. Uniones soldadas de la estructura del eje X	59
Figura 2.34. Soldadura de unión a tope AWS D1.1.....	60
Figura 2.35. Soldadura de Filete de junta tipo T AWS D1.1	60
Figura 2.36. Procedimiento de Cálculo de la sección transversal de las Guías.....	61
Figura 2.37. Esquema del carro porta herramienta. a) Fuerzas actuantes en plano YZ b) Fuerzas actuantes en plano ZX	63
Figura 2.38. Esquema de fuerzas 3D de fuerzas actuantes en carro Z.....	64
Figura 2.39. Esquema de fuerzas que actúan en carro X. a) Fuerzas actuantes en plano YZ. b) Fuerzas actuantes en plano ZX.....	65
Figura 2.40. Esquema 3D de fuerzas que actúan sobre carro X.....	65
Figura 2.41. Esquema 3D de fuerzas que actúan en carro Y.	66
Figura 2.42. Diagramas de Fuerza cortante y Momento flector.	71
Figura 2.43. Esquema de fuerzas que actúan sobre conjunto de pernos y rodamientos de guía de movimiento en el eje X.	75
Figura 2.44. Esquema de fuerzas que actúan sobre sistema de rodamientos para guía de movimiento en eje X e Y.....	75
Figura 2.45. Diagrama de cuerpo libre para rodamientos usados en guía de movimiento.....	76
Figura 2.46. Procedimiento de selección de husillo de bolas recirculantes. Parte 1	77
Figura 2.47. Procedimiento de selección de husillo de bolas recirculantes. Parte 2.	78
Figura 2.48. Métodos de montaje del eje del husillo	81
Figura 2.49. Carro del eje Z. Vista frontal (a), Placa y husillo CNC (b), Vista lateral (c)	82
Figura 2.50. Soporte de Spindle CNC.....	82

Figura 2.51. Diagrama de cuerpo libre en dirección axial del husillo del carro del eje Z.....	83
Figura 2.52. Procedimiento de selección de servomotor.....	93
Figura 2.53. Perfil de velocidad y torque de los carros de máquina CNC.....	98
Figura 2.54. Fuerzas que actúan sobre la estructura X y Z.....	99
Figura 2.55. Fuerzas que actúan sobre la estructura Y.....	99
Figura 2.56. Tensiones aplicadas sobre estructura de soporte.....	100
Figura 2.57. Desplazamientos de la estructura de soporte.....	100
Figura 2.58. Factor de seguridad para la estructura de soporte.....	101
Figura 2.59. Numero jacobiano a lo largo de la malla para estructura de soporte.....	101
Figura 2.60. DCL eje guía del Eje Z.....	102
Figura 2.61. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje Z.....	103
Figura 2.62. Diagrama de Momento Flector del Eje Z.....	103
Figura 2.63. Diagrama de Esfuerzo Deflexión del Eje Z.....	104
Figura 2.64. Diagrama de Deflexión del Eje Z.....	104
Figura 2.65. DCL eje guía del Eje X.....	105
Figura 2.66. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje X.....	106
Figura 2.67. Diagrama de Momento Flector del Eje X.....	106
Figura 2.68. Diagrama Esfuerzo Deflexión del Eje X.....	107
Figura 2.69. Diagrama de Deflexión del Eje X.....	107
Figura 2.70. DCL eje guía del Eje Y.....	108
Figura 2.71. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje Y.....	109
Figura 2.72. Diagrama de Momento Flector del Eje Y.....	109
Figura 2.73. Diagrama Esfuerzo Deflexión del Eje Y.....	110
Figura 2.74. Diagrama de Deflexión del Eje Y.....	110
Figura 2.75. Elementos del PC_SIMU.....	118
Figura 2.76. Diagrama del Control Principal.....	118
Figura 2.77. Diagrama del Panel de Control.....	119
Figura 2.78. Diagrama de Señalización y Seguridad.....	119
Figura 2.79. PLC Siemens S7 200 CPU: 224XP.....	122
Figura 2.80. Funcionamiento de Pulsadores.....	123
Figura 2.81. Pulsador SIRIUS 3SB36 amarillo.....	124
Figura 2.82. Sensores Fotoeléctricos de Barrera réflex.....	124
Figura 2.83. Funcionamiento de Fin de Carrera.....	125
Figura 2.84. Interruptores de posición Osiswitch® Clásico XCK L.....	125
Figura 2.85. Partes de un encoder fotoreceptor incremental.....	126
Figura 2.86. Loop-powered LCD display 5531A.....	127

Figura 2.87. Luces indicadoras con lente lisa SIEMENS- SIRIUS 3SB3244	128
Figura 2.88. Relé de seguridad SIEMENS SIRIUS 3TK2825-1BB40	128
Figura 2.89. Servomotores rotativos Omron.	129
Figura 2.90. Display SIEMENS SIMATIC TD17	131
Figura 2.91. Interfaz de usuario STEP 7 – MicroWIN.....	133
Figura 2.92. S7_200 Selección de CPU.....	154
Figura 2.93. S7_200 Módulos de expansión	154
Figura 2.94. Simulación de encendido de máquina CNC.	155
Figura 2.95. Simulación de ingreso de parámetros (velocidad de avance y coordenadas).	156
Figura 2.96. Simulación. Lectura de datos e inicio de movimiento de servomotores.	156
Figura 2.97. Simulación. Visualización de la posición actual de los ejes de máquina CNC.	157
Figura 2.98. Simulación paro de emergencia en panel de control.	157
Figura 2.99. Simulación. Señalización y seguridad, botón de encendido pulsado.	158
Figura 2.100. Simulación. Señalización y seguridad, pulsador de apagado accionado.	158
Figura 2.101. Simulación. Señalización y emergencia, finales de carrera accionados.....	158
Figura 2.102. Simulación. Panel de control, accionamiento de pulsador “Encendido”	159
Figura 2.103. Simulación. Panel de control, ingreso de parámetros.....	159
Figura 2.104. Simulación. Panel de control, lectura de datos e inicio de movimiento.	160
Figura 2.105. Simulación. Panel de control, posición actual es igual a deseada.	160
Figura 3.1. Estructura de madera para prototipo.....	168
Figura 3.2. Varilla roscada con tuerca de Bronce.....	168
Figura 3.3. CAD del Prototipo CNC.....	169
Figura 3.4. PLC MicroLogix 1100 de Allen-Bradley.....	170
Figura 3.5. HMI LabVIEW para el prototipo.....	173

Índice de tablas

Tabla 1.1. Secuencia de encendido de bobinas en un motor paso a paso bipolar.	7
Tabla 1.2. Servomotor vs Motor paso a paso.....	10
Tabla 2.1. Demandas y requerimientos del usuario.	14
Tabla 2.2. Especificaciones de Router CNC de la empresa SupraCNC.....	15
Tabla 2.3. Especificaciones centro de mecanizado ROMI D800	16
Tabla 2.4. Especificaciones Centro de prototipado rápido Roland MDX-40a	17
Tabla 2.5. Especificaciones de Centro de Mecanizado VCM3-M400	18
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del Centro de mecanizado TRAVIS CNC MM-4.	19
Tabla 2.7. Especificaciones de centro de Mecanizado VF-2 de HAAS.....	20
Tabla 2.8. Especificaciones de Centro de Mecanizado XK 7145A.	21
Tabla 2.9. Análisis de la competencia o Benchmarking.	22
Tabla 2.10. Requerimientos técnicos.	23
Tabla 2.11. Correlaciones entre demandas y características técnicas.	23
Tabla 2.12. Resultados de la evaluación técnica de las demandas del cliente.....	24
Tabla 2.13. Correlación entre características técnicas.	25
Tabla 2.14. Especificaciones técnicas.	26
Tabla 2.15. Módulos considerados para el diseño de la máquina CNC.	27
Tabla 2.16. Alternativas de solución del módulo de sujeción.	32
Tabla 2.17. Gráficas de alternativas de solución del módulo de sujeción.....	32
Tabla 2.18. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de sujeción.....	33
Tabla 2.19. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de sujeción.	33
Tabla 2.20. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Fuerza de sujeción.....	34
Tabla 2.21. Criterios ponderados alternativas sujeción vs tiempo de sujeción y soldadura.....	34
Tabla 2.22. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Costo.	34
Tabla 2.23. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Riesgo de Impacto.	35
Tabla 2.24. Conclusión de criterios ponderados para alternativas del módulo de sujeción.	35
Tabla 2.25. Alternativas de solución del módulo de guía de movimiento.....	38
Tabla 2.26. Figuras de alternativas de solución del módulo de guía de movimiento. ...	39
Tabla 2.27. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de guía de movimiento.	39
Tabla 2.28. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de guía de movimiento.	39

Tabla 2.29. Criterios ponderados alternativas de guía vs Fuerza.....	40
Tabla 2.30. Criterios ponderados alternativas de guía vs Carga.	40
Tabla 2.31. Criterios ponderados alternativas de guía vs Costo.	40
Tabla 2.32. Criterios ponderados alternativas de guía vs Vida útil.	40
Tabla 2.33. Conclusión de criterios ponderados para módulo de guía de movimiento.	40
Tabla 2.34. Alternativas de solución para módulo de transmisión de movimiento.	44
Tabla 2.35. Gráficos correspondientes a las alternativas de solución para módulo de transmisión de movimiento.	44
Tabla 2.36. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de transmisión de movimiento.	44
Tabla 2.37. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de transmisión de movimiento.	45
Tabla 2.38. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Precisión.....	45
Tabla 2.39. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Velocidad.....	45
Tabla 2.40. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Costos.	46
Tabla 2.41. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Vida Útil.	46
Tabla 2.42. Conclusión de criterios ponderados para módulo de transmisión de movimiento.	46
Tabla 2.43. Diagrama morfológico	46
Tabla 2.44. Parámetros de la Herramienta Coromil 415	53
Tabla 2.45. Parámetros de corte para plaquita 415-05 02 06M-30 1040.....	54
Tabla 2.46. Fórmulas para calcular la tasa de remoción de material (R).....	55
Tabla 2.47. Factores de desgaste de la herramienta, W.	56
Tabla 2.48. Factor de eficiencia de la máquina-herramienta	57
Tabla 2.49. Potencia de corte y Potencia del motor respectivamente para diferentes diámetros.....	57
Tabla 2.50. Características técnicas de husillo CNC ER20 de 3kW.	57
Tabla 2.51. Resultados tornillos de sujeción del husillo	59
Tabla 2.52 Uniones soldadas – Configuración de junta a tope.....	60
Tabla 2.53. Uniones soldadas – Configuración soldadura de filete.	60
Tabla 2.54. Fuerza de corte para diferentes diámetros de herramienta Coromil 415. .	62
Tabla 2.55. Reacciones resultantes para el eje Z.	64
Tabla 2.56. Reacciones resultantes para el eje X.	66

Tabla 2.57. Reacciones resultantes para el eje Y.	67
Tabla 2.58. Límite de resistencia a la fatiga para los diferentes diámetros de eje.	70
Tabla 2.59. Reacciones en los extremos de los ejes Guías.	72
Tabla 2.60. Resultados de cálculo de diámetro del eje guía Z.	74
Tabla 2.61. Posibles diámetros de husillos en función del paso.	80
Tabla 2.62. Factor de seguridad en función del tipo de sistema.	88
Tabla 2.63. Factor de Carga	90
Tabla 2.64. Reacciones y momentos sobre estructura de soporte.	98
Tabla 2.65. Tensión, desplazamiento y factor de seguridad de estructura de soporte.	100
Tabla 2.66. Datos eje guía del Eje Z.	102
Tabla 2.67. Resultados de ejes guías en el Eje Z.	102
Tabla 2.68. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje Z.	104
Tabla 2.69. Datos eje guía del Eje X.	105
Tabla 2.70. Resultados de ejes guías en el Eje X.	105
Tabla 2.71. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje X.	107
Tabla 2.72. Datos eje guía del Eje Y.	108
Tabla 2.73. Resultados de ejes guías en el Eje Y.	108
Tabla 2.74. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje Y.	110
Tabla 2.75. Ejes guías seleccionados para cada eje de la máquina.	111
Tabla 2.76. Evaluación de rodamientos usados en guía de movimiento.	112
Tabla 2.77. Rodamientos SKF seleccionados.	112
Tabla 2.78. Evaluación de rodamientos lineales utilizados en eje Z.	113
Tabla 2.79. Rodamientos lineales BOSCH.	113
Tabla 2.80. Evaluación de parámetros para husillo de bolas	114
Tabla 2.81. Modelos seleccionados de husillos de bolas	114
Tabla 2.82. Evaluación de parámetros para servomotores	115
Tabla 2.83. Modelos seleccionados de servomotores.	115
Tabla 2.84. Entradas digitales.	120
Tabla 2.85. Entradas Analógicas	120
Tabla 2.86. Salidas analógicas	120
Tabla 2.87. Salidas digitales	121
Tabla 2.88. Número de entradas y salidas necesarias.	121
Tabla 2.89. Pulsadores requeridos en el control.	123
Tabla 2.90. Especificaciones de encoder de servomotores R88M-UXXX30H.	126
Tabla 2.91. Motores seleccionados de la marca Omron.	129
Tabla 2.92. Especificaciones de servodrive R88D- UAXXH Omron	130

Tabla 2.93. Configuraciones posibles del Display TD17	130
Tabla 2.94. Secuencia Principal de las operaciones de control.....	131
Tabla 2.95. Secuencia Secundaria de las operaciones de control.	132
Tabla 2.96. Elementos de programación ladder.....	134
Tabla 2.97. Costo de materiales para mecanizado de elementos de la máquina	161
Tabla 2.98. Costos de Fabricación.....	162
Tabla 2.99. Costos de elementos Normalizados y Estandarizados.	163
Tabla 2.100. Costos de implementación de Control Automático.	164
Tabla 2.101. Costos Indirectos	165
Tabla 2.102. Presupuesto de la Máquina CNC de 3 Ejes.	165
Tabla 3.1. Precio de los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de la máquina CNC diseñada vs precio de la competencia...	167
Tabla 3.2. Semejanzas entre el prototipo y diseño propuesto	169
Tabla 3.3. Diferencias entre el prototipo y diseño propuesto.....	170
Tabla 3.4. Diferencias entre S7-200 y MicroLogix 1100 parte 1	171
Tabla 3.5. Diferencias entre S7-200 y MicroLogix 1100 parte 2	172
Tabla 3.6 Puntos de secuencia Prueba N° 1.....	174
Tabla 3.7. Puntos de secuencia Prueba N° 2.....	176

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo diseñar mecanismos y simular el control automático del sistema de posicionamiento y desplazamiento en 3 dimensiones de la herramienta en una máquina CNC.

La investigación se inició con un estudio bibliográfico sobre las máquinas CNC para brindar un soporte científico sobre el tema; lo cual permitió realizar la definición del producto en la parte del diseño conceptual y mediante el método de diseño concurrente se obtuvo las especificaciones técnicas de la máquina. Al final del diseño conceptual se presentó y se seleccionó alternativas de solución para los módulos propuestos.

En la etapa correspondiente al diseño mecánico se realizó el redimensionamiento de las piezas que conforman la máquina en el programa CAD; SOLIDWORKS, mediante el análisis de parámetros, funciones y condiciones críticas que permitieron obtener las dimensiones reales de las piezas de la máquina. Al finalizar esta etapa se obtuvieron planos de conjunto, subconjunto y taller de las piezas que conforman la máquina.

Conjuntamente con el diseño mecánico se realizó el diseño del control automático para el PLC S7-200 mediante el uso del programa Step-7 MicroWIN y su posterior simulación en el simulador S7-200 y PC-Simu.

Al final se presenta un análisis de costos, como aporte adicional se realizó un prototipo funcional con ayuda del equipo de laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería.

Palabras clave: diseño, simular, CNC, control.

ABSTRACT

The objective of this project is to design mechanisms and simulate the automatic control of the positioning and displacement systems in 3 dimensions of the cutting tool in a CNC machine.

The research initiated with a bibliographical study of CNC machines to provide scientific support on the topic; this allowed to define the product in the part of the conceptual design and applying the concurrent design method the technical specifications of the machine were obtained. At the end of the conceptual design are presented and selected the different alternatives of solution for the proposed modules.

In the mechanical design were hold the resizing of the parts that make up the machine with help of the CAD program SOLIDWORKS and through the analysis of parameters, functions and critical conditions that allowed to obtain the final dimensions of the parts of the machine. At the end of this stage were obtained drawings of assembly, subset and workshop of the parts that make up the machine.

In conjunction with the mechanical design, the automatic control was designed for the PLC S7-200 by using the MicroWIN Step-7 program and its simulation in the S7-200 and PC-Simu simulator.

In the end, a cost analysis is presented, and a functional prototype was carried out with the help of the Automation laboratory team of the Faculty of Engineering.

Keywords: design, simulate, CNC, control.

“Diseño de mecanismos y simulación del control automático del sistema de posicionamiento y desplazamiento en 3 dimensiones de la herramienta en una máquina CNC”

INTRODUCCIÓN

Los sectores productivos de un país son la base sobre la cual se desarrolla su economía. En el Ecuador, un sector productivo de gran importancia es el sector metalmecánico, que representa el 14% del PIB y genera el 65% de empleo [1]. En el país se tiene gran cantidad de metalmecánicas, de las cuales registradas se encuentran alrededor de 400. Con respecto a estas empresas y su producción nacional, el 90% se destina para comercio interno y el restante con fines de exportación [1]. De la amplia gama de productos cabe destacar la producción de: perfiles estructurales, tuberías, línea blanca y repuestos automotrices [2].

En el periodo 2007-2012, el sector tuvo un decrecimiento del 13,45% de las toneladas de exportación [1]. Esto debido a la disminución en el precio del barril de crudo en el sector petrolero, uno de los principales compradores de productos del sector metalmecánico [2]. El automatizar un proceso productivo sirve para mejorar la calidad del producto y la seguridad del proceso, disminuir emisiones y tener un uso eficiente de los recursos [3]. Por esta razón el proponer una máquina controlada numéricamente por computadora como una alternativa para la mejora en la competitividad de este sector.

Objetivo general

Diseñar mecanismos y simular el control automático del sistema de posicionamiento y desplazamiento en 3 dimensiones de la herramienta en una máquina CNC.

Objetivos específicos

- Seleccionar alternativas de diseño para la transmisión de movimiento y potencia a los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de una máquina CNC.
- Diseñar los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de una máquina CNC.
- Identificar el tipo de control que mejor se adapte a los requerimientos de precisión y velocidad de movimiento en máquinas CNC.
- Simular el control automático del sistema propuesto y verificar su correcto funcionamiento.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Planteamiento del problema

El sector metalmecánico es un pilar importante en la economía del Ecuador, siendo capaz de generar alrededor de USD 70 millones de dólares en exportaciones anuales [1]. Lamentablemente, las metalmecánicas en el país enfrentan un mal momento debido a que la crisis del sector petrolero ha generado un incremento en la importación de piezas y repuestos de maquinaria y vehículos, que presentan un precio inferior en comparación a elementos de fabricación nacional [2]. En consecuencia, el mercado de piezas mecanizadas a nivel local e internacional está saturado de piezas importadas, principalmente desde China.

Para contribuir al desarrollo del sector metalmecánico, se propone generar alternativas tecnológicas que fomenten el crecimiento y competitividad de la industria metalúrgica en el Ecuador. El automatizar el proceso de obtención de piezas metálicas permite mejorar los tiempos de producción, estandarizar el producto final, incrementar los estándares de calidad, y reducir los niveles de desperdicio y consumo de recursos [4]. Como objetivo del proyecto planteado, el diseño y desarrollo de mecanismos de posicionamiento de una máquina CNC deberá fomentar la manufactura a gran escala y la producción de piezas y repuestos en el país.

En el campo educativo, el diseño de mecanismos de posicionamiento de una máquina herramienta CNC, y su automatización en base a controladores lógicos programables (PLC's), representan avances en los campos de estudio relacionados con la construcción de máquinas CNC en el país. En general, en centros de educación superior en el Ecuador, el número de temas de tesis relacionados al diseño y control de máquinas CNC es reducido. En la EPN se han desarrollado los siguientes trabajos: 1°)Diseño y simulación de un Router CNC para corte por plasma a partir de archivos DXF 2D [5]. 2°)Automatización e implementación de un sistema CNC para una fresadora vertical tipo torreta [6]. 3°)Diseño y construcción de una máquina fresadora CNC de 3 grados de libertad con un volumen de trabajo útil de 500 x 500 x 100 mm para tallar madera en alto y bajo relieve [7].

Adicionalmente, para validar el funcionamiento y control de los mecanismos diseñados, el proyecto plantea la simulación del desplazamiento de una herramienta de corte en los ejes X, Y y Z, en cumplimiento de una orden de trabajo y en base a una programación específica de control automático.

1.2. Generalidades de máquinas CNC

1.2.1. Tipos de máquinas CNC

Las máquinas CNC se pueden clasificar por varios criterios, tales como: tipo de movimiento, tipo de control, número de ejes. Estos criterios se describen a continuación:

1.2.1.1. Por tipo de movimiento.

- Sistemas punto a punto

En este tipo de máquinas, tanto la pieza de trabajo como la herramienta se colocan en posiciones relativas predeterminadas, en las cuales permanecen hasta que la herramienta de corte realiza su trabajo. Cada eje de la máquina se controla por separado, por lo cual la información necesaria para el movimiento de la herramienta es la posición relativa de dos ejes, la herramienta de trabajo se desplaza con un eje diferente y los demás ejes no pueden moverse hasta que la herramienta se retira del espacio de trabajo, tal como se muestra en Figura 1.1. Ejemplos de este tipo de sistemas son: Máquinas de taladrado, perforación y roscado [8].

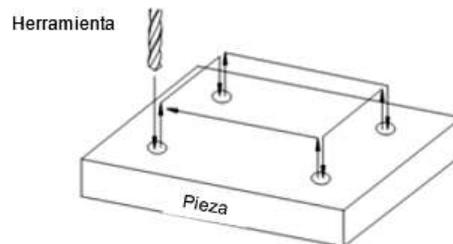


Figura 1.1. Sistema Punto a Punto.
(Fuente:[8])

- Sistema de contorno

Este tipo de sistema implica el movimiento de la pieza de trabajo con respecto a la herramienta de trabajo mientras se realiza la operación de corte, como se puede observar en la Figura 1.2. Estas máquinas requieren de un control simultáneo de los ejes. La información de velocidad y posición de cada eje de la máquina son censados continuamente por el sistema de control. Ejemplo de este tipo de máquinas son: Fresadoras CNC o Centros de mecanizado [8].

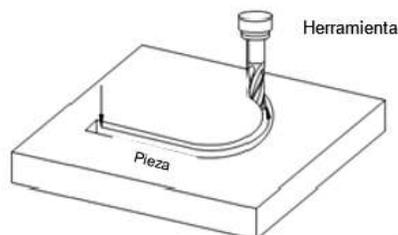


Figura 1.2. Sistema de contorno.
(Fuente: [8])

1.2.1.2. Por tipo de control.

- Control en lazo abierto

En un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. A cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija, por lo cual la precisión del sistema depende de la calibración del mismo. Es un sistema por lo general utilizado en máquinas que utilizan sistema de punto a punto [9].

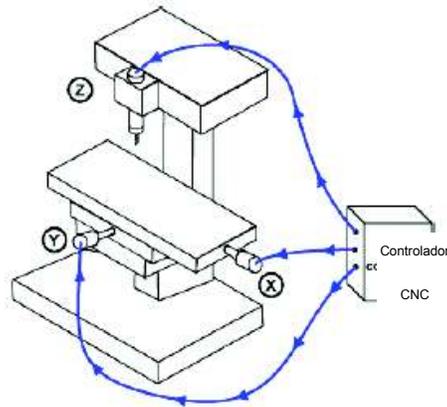


Figura 1.3. Sistema en lazo abierto.
(Fuente:[8])

- Control en lazo cerrado

Este tipo de sistemas poseen retroalimentación que permite monitorear la salida y corregir discrepancias con respecto a los datos ingresados. Los parámetros que se suelen controlar son la velocidad, posición y torque (potencia). En el control con lazo cerrado se alimenta al controlador con la señal de error la cual es la diferencia entre la señal de entrada y señal de realimentación, para poder reducir el error y conseguir la salida deseada. Este tipo de sistemas son muy rápidos y precisos ya que pueden compensar automáticamente cualquier desviación [10].

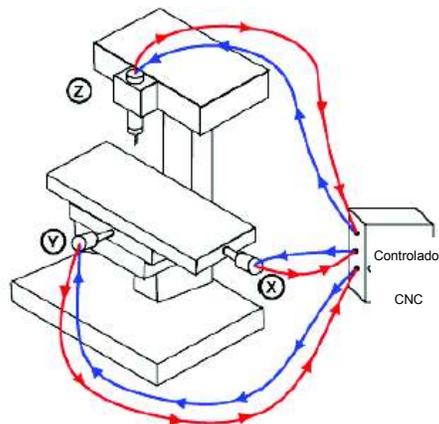


Figura 1.4. Control en lazo cerrado.
(Fuente: [8])

1.2.1.3. Por número de ejes

Este tipo de clasificación se centra en el número de ejes que posee la máquina, es decir las formas de desplazamiento relativo de la herramienta con respecto a la pieza. De acuerdo a esto se tiene la siguiente división [9]:

- Dos ejes de movimiento: Se trata de máquinas que solo permiten el control de dos ejes, usualmente estos ejes son el X y Z. Se tiene como ejemplo: Cortadoras laser, impresoras CNC, cortadoras de plasma.
- Tres ejes de movimiento: Son máquinas que permiten el movimiento simultáneo en tres ejes (X, Y, Z).
- Dos y medio ejes de movimiento: Son consideradas máquinas de tres ejes, sin embargo, los dos ejes de movimiento no pueden funcionar a la par de los dos ejes de posicionamiento. Las máquinas de dos y medio ejes, utilizan sistemas de movimiento punto a punto. Ejemplos de estas máquinas son: taladrado, perforación y roscado.
- Cuatro ejes de movimiento: Estas máquinas poseen los tres ejes de movimiento X, Y, Z, y además poseen un eje extra de rotación llamado B, el cual es independiente de los otros ejes.
- Cinco o más ejes de movimiento: como ejes principales poseen los de movimiento X, Y, Z, adicionalmente poseen ejes de rotación alrededor de los ejes principales A, B o C. También pueden tener diferentes ejes de desplazamiento tanto la pieza de trabajo como la herramienta. Un ejemplo de máquina CNC de 5 ejes lo podemos ver en la Figura 1.5

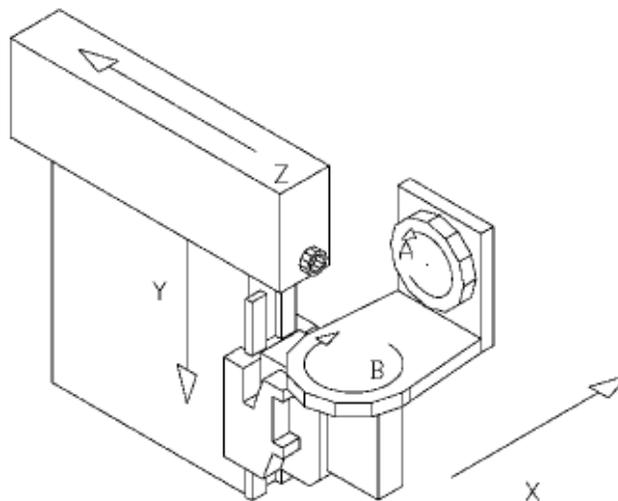


Figura 1.5. Ejes de movimiento de máquinas de 5 ejes.
(Fuente: [10])

1.3. Tipo de Motores utilizados en máquinas CNC

1.3.1. Motores de Pasos



Figura 1.6. Motor paso a paso Bipolar Nema 17

(Fuente: [11])

En la actualidad, muchas máquinas CNC, como son impresoras 3D, centros de prototipado rápido y pequeños centros de mecanizado que trabajan sobre madera utilizan motores paso a paso.

Los motores paso a paso son dispositivos electromagnéticos que convierten pulsos digitales en rotación mecánica (ángulos discretos). La cantidad de rotación es directamente proporcional al número de pulsos y la velocidad es relativa a la frecuencia de los pulsos [12].

Se suele clasificar a los motores paso a paso en: motores de reluctancia variable y motores de imán permanente. Los motores paso a paso de imán permanente son los más usados, ya que diferencia de los de reluctancia variable, estos son capaces de mantener un par diferente de cero cuando el motor no está energizado y su funcionamiento se explica a continuación.

- Motor paso a paso de imán permanente

Este motor consta de un rotor con polos norte y sur, y un estator con un determinado número de polos. De manera general el funcionamiento del motor se consigue al energizar el estator, produciendo que el rotor de imán permanente se alinee con el campo magnético. Al cambiar la orientación de los polos, el rotor tratará de buscar la nueva posición de equilibrio. Manteniendo dicha situación se conseguirá un movimiento continuo del rotor [13].

La resolución de este tipo de motores se incrementa al aumentar el número de polos del rotor o el número de fases.



Figura 1.7. Formas constructivas de aumentar resolución de motores paso a paso.

(Fuente:[14])

Los motores de imán permanente pueden clasificarse en unipolares y bipolares. En comparación a los motores unipolares, los motores bipolares ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso.

- Motores paso a paso bipolares

Este tipo de motores, a diferencia de los unipolares, carecen de doble bobinado en el estator, y como consecuencia, es necesario cambiar continuamente la polaridad para generar los cambios de dirección. Este problema se soluciona mediante circuitos integrados (uso de puente H).

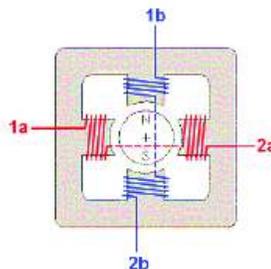


Figura 1.8. Motor paso a paso Bipolar

(Fuente:[14])

Otra diferencia entre el motor paso a paso unipolar y el bipolar es que el primero se activa una bobina a la vez mientras que un motor bipolar se activa más de una bobina a la vez. Característica que hace que un motor bipolar tenga más torque que un motor unipolar [13]. Un ejemplo de la secuencia de energización de las bobinas del motor puede visualizarse en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Secuencia de encendido de bobinas en un motor paso a paso bipolar.

N° Pasos	1a	2a	1b	2b
Paso 1	+Vcc	GND	+Vcc	GND
Paso 2	+Vcc	GND	GND	+Vcc
Paso 3	GND	+Vcc	GND	+Vcc
Paso 4	GND	+Vcc	+Vcc	GND

(Fuente: [14])

Empezando la secuencia de energización, cuando se energice la bobina 1a y la bobina 1b, de acuerdo a la Figura 1.8. El rotor del motor bipolar girará un ángulo de 45° con respecto a la vertical en sentido anti horario. Conforme se vaya siguiendo la secuencia, el rotor continuará girando 45° en sentido antihorario. La secuencia se repetirá tantas veces como vueltas se desea que realice el motor.

1.3.2. Servomotores

Un servomotor es un motor eléctrico en el cual la velocidad y/o posición se controlan mediante un encoder. Con datos medidos de posición y/o velocidad del motor, es posible retroalimentar el sistema de control y corregir errores entre los valores de consigna y los valores reales. Este aspecto permite que los servomecanismos sean capaces de reaccionar ante imprevistos.

Entre las ventajas que brindan los servomotores se puede enunciar:

- Par elevado
- Fiabilidad de funcionamiento
- Bajo mantenimiento (Servomotores DC Brushless)
- Control de velocidad y posición
- Capacidad de velocidades altas
- Pérdidas en el rotor bajas
- Construcción cerrada, útil para trabajar en ambientes sucios [15].

Los servomotores pueden clasificarse en servomotores de corriente continua o servomotores de corriente alterna. De interés para el presente estudio son los servomotores de corriente alterna, y específicamente, en los servomotores tipo brushless (sin escobillas).

- Servomotores tipo brushless o de imanes permanentes

La característica que hace tan especiales a estos motores, es su capacidad de desarrollar altos pares (en el orden de 3 a 4 veces su par nominal) en forma transitoria para oponerse a esfuerzos que desestabilizan el sincronismo del motor [15]. Este tipo de servomotores están constituidos por un estator segmentado, en el que el espacio relleno de cobre es aproximadamente el doble que el espacio en los motores tradicionales. Esta característica permite desarrollar una mayor potencia con un menor volumen. Adicionalmente, debido a la reducción de la inercia del rotor, el tiempo de posicionamiento se reduce, debido a que se puede alcanzar altas velocidades en pequeños tiempos [16].



Figura 1.9. Servomotores tipo Brushless.
(Fuente: [17])

- Encoder

Un encoder convierte el movimiento en una señal eléctrica que puede ser procesada por un equipo de adquisición de datos o un controlador, como puede ser un PLC [18]. Los encoders pueden clasificarse de acuerdo a su principio de funcionamiento, como encoders mecánicos, magnéticos, de resistencia y ópticos. Los más utilizados son de tipo óptico debido a su elevada precisión y resolución [19].

Los encoders ópticos generan información de posicionamiento a partir de la interrupción de un haz de luz con respecto a un patrón determinado. Como puede observarse en la Figura 1.10. un haz de luz emitido por un LED, pasa a través de un disco de código generado en base a líneas opacas. A medida que el eje del encoder gira, el haz de luz del LED es interrumpido por las líneas opacas en el disco, y se genera un patrón de recepción en una unidad fotodetectora. El patrón de recepción genera una señal de pulso (luz = 1; sin luz = 0) que es procesada mediante un contador o controlador [20].

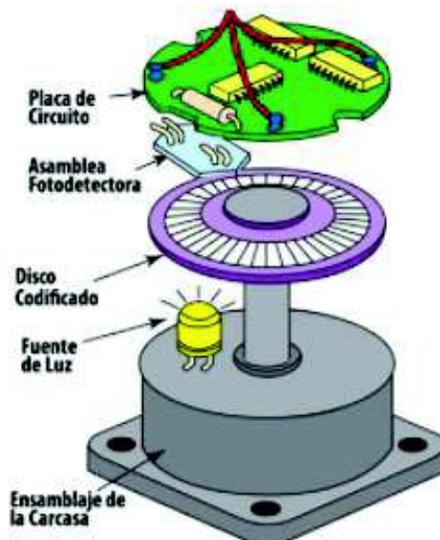


Figura 1.10. Principio físico de un encoder óptico.
(Fuente: [20])

El disco codificado de un encoder óptico puede incluir canales de ranuras desfasadas 90°, con el fin de identificar el sentido de giro. Dependiendo del sentido de giro, con respecto a la Figura 1.11., el canal A o el canal B emitirán su señal en un orden establecido. En ciertos modelos de encoders, el disco codificado presenta un tercer canal con una sola ranura, lo que permite verificar si el eje del motor realiza un giro completo [18].

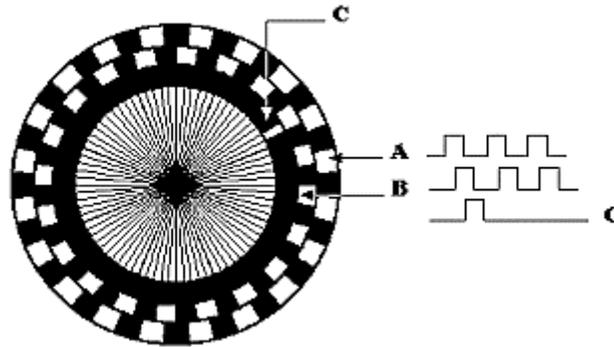


Figura 1.11. Disco codificado de un encoder para controlar el sentido de giro.
(Fuente:[18])

Entre los tipos de encoders ópticos, se tienen los encoders incrementales y los encoders absolutos. Un encoder absoluto genera información de posiciones exactas o absolutas, mientras que un encoder incremental genera posiciones relativas con respecto a un nivel de referencia [7].

La selección entre un motor a pasos y un servomotor dependerá de la aplicación donde van a usarse. La Tabla 1.2 muestra una comparación de características típicas de motores paso a paso y servomotores realizada por [21].

Tabla 1.2. Servomotor vs Motor paso a paso.

Característica	Servomotor	Motor paso a paso
Resolución	25 000 pasos	10 pasos
Velocidad	6 000 RPM	Hasta 700RPM
Torque	Hasta 70Nm	Hasta 30Nm
Precio de compra	Alto	Bajo
Costo de instalación	Alto	Bajo
Mantenimiento	Bajo	Bajo

(Fuente: [21])

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis funcional

2.1.1. Fundamentos del análisis funcional

En el análisis funcional se identifican las funciones básicas del sistema objeto de diseño, para así lograr un mejor desarrollo de la estructura modular. Este análisis parte de la definición de una función global, que representa la tarea principal del producto diseñado. Posteriormente, la función principal se divide en subfunciones (subtareas) que describen la configuración y funcionamiento del sistema con mayor detalle [22].

2.1.2. Diagramas funcionales

2.1.2.1. Nivel 0

En el nivel 0 se identifica la acción global del sistema objeto de diseño. Para este sistema, la acción principal es la de desplazar y posicionar la herramienta de corte.

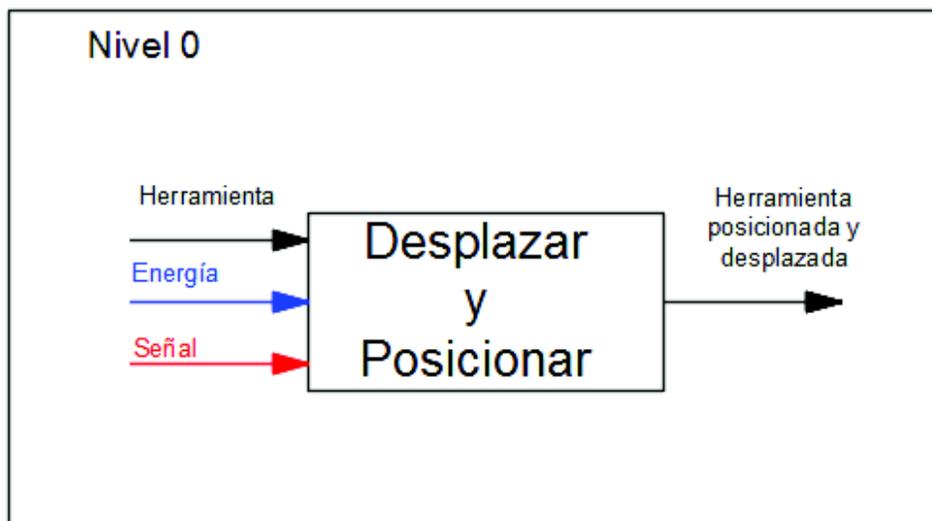


Figura 2.1. Nivel 0 del análisis funcional
(Fuente: Propia)

2.1.2.2. Nivel 1

Para el nivel 1, como se muestra en la Figura 2.2, se señalan 4 modos de operación en correspondencia a los módulos del sistema:

- Fijar pieza de trabajo y herramienta de corte
- Accionar y controlar el sistema de forma automática, módulo que hace referencia a las funciones del controlador de la máquina CNC.
- Guiar movimiento.
- Desplazar y posicionar

En el nivel 1 se observa las subfunciones del sistema. Para encontrar una solución global para el sistema a diseñarse se debe hallar las soluciones parciales a cada uno de sus módulos [22].

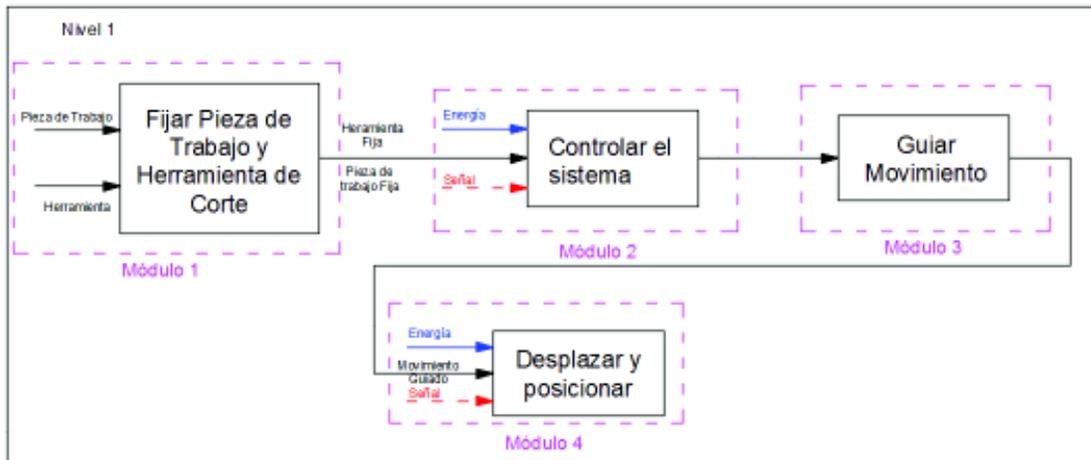


Figura 2.2. Nivel 1 del análisis funcional
(Fuente: Propia)

2.1.2.3. Nivel 2

En el nivel 2 se desglosan los módulos identificados en el nivel 1. Para el caso de estudio, el análisis llegó solamente hasta un nivel 2, ya que el segmentando de niveles posteriores conlleva a generar soluciones implícitas. Con el nivel 2, como se muestra en la figura 2.3, cada módulo se explica con mayor detalle. En este nivel se presentan las subfunciones o subtareas de cada módulo.

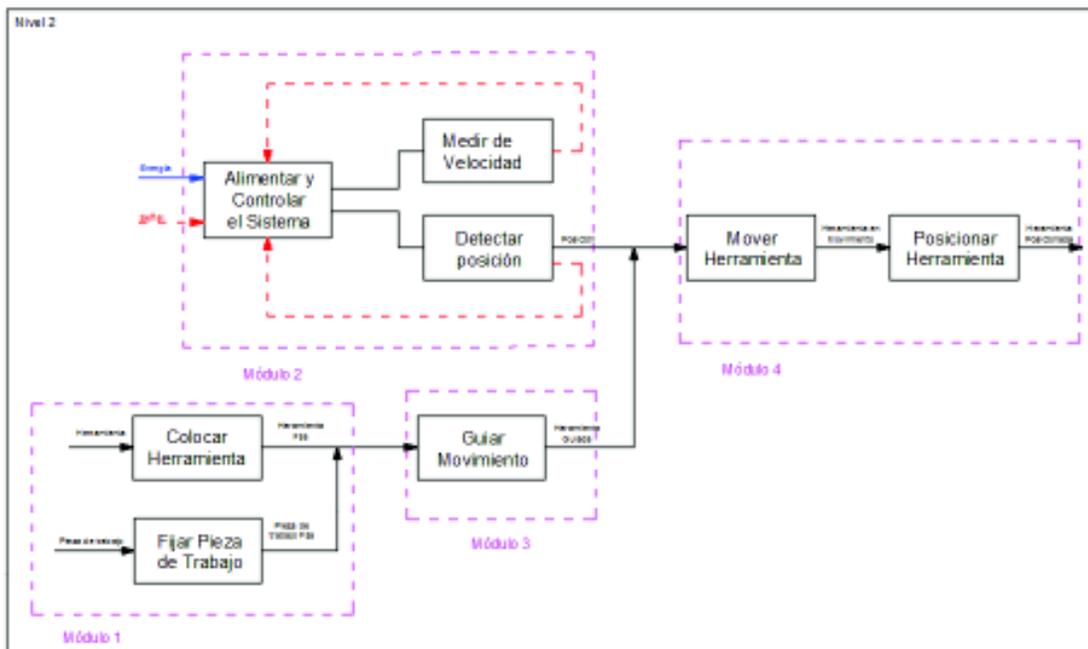


Figura 2.3. Nivel 2 del análisis funcional
(Fuente: Propia)

2.2. Determinación de especificaciones

2.2.1. Consideraciones

Para la determinar especificaciones se realiza un análisis de máquinas CNC disponibles en el mercado ecuatoriano, y se enfatiza el estudio del sistema de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de trabajo, con el fin de identificar opciones para mejorar e innovar el diseño del mismo. Además, se toma como referencia y punto de partida las necesidades y exigencias de los usuarios en las diferentes aplicaciones.

2.2.2. Casa de la calidad

El análisis de la Casa de la Calidad permite examinar los requerimientos del cliente/usuario (empresas y talleres del sector metalmecánico en el Ecuador), para contrastar y complementar las especificaciones definidas por quien diseña la máquina (denominado “el ingeniero” en este apartado). Adicionalmente, la competencia se define como el conjunto de individuos, empresas y organizaciones que producen y/o comercializan máquinas o sistemas similares a los propuestos. Para el presente proyecto, el análisis de la competencia se enfoca en datos obtenidos de las comercializadoras TECHDESIGN y BKB Maquinaria Industrial; dos empresas ecuatorianas.

El estudio de sistemas ya existentes y desarrollados por la competencia proporciona información valiosa que permite traducir las demandas de los usuarios en requerimientos técnicos del producto [22].

2.2.2.1. Voz del Usuario

En este apartado se incluye todos los requerimientos, necesidades y exigencias presentadas por potenciales usuarios de máquinas CNC. Dicha información se obtuvo a partir del contacto de representantes en las siguientes empresas y centros de estudio

- Laboratorio de Máquinas y Herramientas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.
- Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.
- COBE empresa de corte y grabado láser ubicada en Cayambe
- Metalmecánica de San Bartolo, Escuela Politécnica Nacional.

La información obtenida se catalogará de la siguiente manera:

- Demandas básicas: Aquellas que no son formuladas por los usuarios ya que se consideran obvias; sin embargo, por su incumplimiento el usuario podrá manifestar insatisfacción con el producto.
- Demandas unidimensionales: Con su mejora aumenta proporcionalmente la satisfacción de los usuarios.
- Demandas estimulantes: Aquellas que complacen al usuario y diferencian un producto de otro [22].

Tabla 2.1. Demandas y requerimientos del usuario.

N°	Demandas	Clasificación
1	Se desea una máquina compacta	Unidimensional
2	Se desea un avance rápido de la herramienta (desplazamiento rápido)	Básico
3	Se desea tener un porta-herramientas versátil	Estimulante
4	Se desea una máquina de bajo de Costo	Estimulante
5	Se desea tener una estructura estable	Básico
6	Se desea tener una máquina cuyo mantenimiento sea sencillo	Unidimensional
7	Se desea un bajo consumo de energía	Estimulante
8	Se desea que el posicionamiento de la máquina sea preciso	Básico
9	Se desea una vida útil elevada	Básico
10	Se desea que su operación sea segura	Básico

(Fuente: Propia)

2.2.2.2. Análisis de la competencia – Benchmarking

En este apartado se realizó el estudio de las máquinas que ofertan las diferentes empresas, tanto nacionales como internacionales, para obtener una idea del estado del mercado en esta área.

2.2.2.2.1. Industria nacional

Dentro del país la fabricación de máquinas CNC se realiza en pequeña escala y restringiéndose únicamente a la producción de grabadoras laser, cortadoras laser, cortadoras plasma y routers CNC. La empresa que realiza la producción de dichas máquinas es SupraCNC ubicada en la ciudad de Quito, sin embargo, cabe destacar que se utilizan partes importadas para la manufactura de estas máquinas.

A continuación, se detallan las características del router CNC fabricado por la empresa SupraCNC.

- **Router CNC de SupraCNC**

Router para trabajo industrial pesado, su estructura se encuentra completamente construida en acero estructural de elevada resistencia. Además posee suave desplazamiento sobre guías de movimiento ya que las mismas se encuentran templadas y rectificadas bajo normas europeas. La mesa de trabajo permite una fácil sujeción mecánica de materiales a ser mecanizados. Ofrece un cambio automático de herramientas realizar diferentes operaciones de mecanizado. Adicionalmente se ofrece accesorios como: 4to eje, extractor de viruta, cuchilla oscilante, visión para encuadre de materiales impresos.



Figura 2.4. Router CNC de la empresa SupraCNC.
(Fuente: [23])

Tabla 2.2. Especificaciones de Router CNC de la empresa SupraCNC.

Empresa		SupraCNC	
Modelo		RMA 1325	
Volumen de trabajo	Eje x	130	mm
	Eje y	250	mm
	Eje z	15	mm
Rango de velocidad (husillo)		Hasta 24000	rpm
Capacidad de herramientas		8	U
Potencia instalada (husillo)		20/15	cv/kW

(Fuente:[23])

2.2.2.2.2. Industria internacional

Existe una demanda muy alta para la implementación de centros de mecanizado para la manufactura de piezas metálicas, debido a la facilidad de reproducción de piezas y la disminución de tiempos de trabajo. Por lo antes mencionado, existe una gran oferta de máquinas CNC. A continuación, se incluyen las especificaciones de algunos modelos de las marcas más importantes en el mercado internacional, además de algunos modelos de centros de mecanizado CNC de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

- **Centro de Mecanizado ROMI D800 (Adquirido por EPN)**

Los Centros de Mecanizado Verticales de la Línea ROMI D, con CNC FANUC o SIEMENS, son máquinas flexibles para múltiples aplicaciones de mecanizado en entornos de producción y matricerías. La variedad de modelos con rotaciones hasta 15000 rpm y eje X entre 600 mm y 1530 mm, permite una adecuada aplicación en distintos tipos de piezas y materiales.



Figura 2.5. Centro de Mecanizado ROMI D800.
(Fuente: [24])

Tabla 2.3. Especificaciones centro de mecanizado ROMI D800

Empresa		ROMI	
Modelo		ROMI D 800	
Recorrido	Eje x	800	mm
	Eje y	530	mm
	Eje z	580	mm
Avance	Eje x/y	30	m/min
	Eje z	30	m/min
Rango de velocidad (husillo)		8 a 8000	rpm
Capacidad de herramientas		30	u
Potencia instalada (husillo)		20/15	cv/kW
Controlador		Fanuc 0i-MD Siemens 828D	

(Fuente: [25])

- **Centro de prototipado rápido Roland MDX-40a (Adquirido por EPN)**

Como dispositivo de Prototipado Rápido Sustractivo (SRP) intuitivo y de fácil uso, la compacta MDX-40A (Figura 2.6) se adapta a cualquier Fab Lab (Taller de fabricación personal), taller, oficina o aula, permitiendo que usuarios principiantes y avanzados creen modelos 3D de precisión. [26]



Figura 2.6. Centro de prototipado rápido Roland MDX-40a.
(Fuente: [26])

Tabla 2.4. Especificaciones Centro de prototipado rápido Roland MDX-40a

Empresa		Roland	
Modelo		MDX-40a	
Recorrido	Eje x	305	Mm
	Eje y	305	Mm
	Eje z	105	Mm
Avance	Eje x/y	15 a 30	mm/s
	Eje z	15 a 30	mm/s
Rango de velocidad (husillo)		450 a 15000	rpm
Capacidad de herramientas		1	u
Potencia instalada (husillo)		210	W
Controlador		Controlado por una computadora de escritorio	

(Fuente: [26])

- **Centro de mecanizado VIWA VCM3-M400 (Adquirido por EPN)**

El centro de maquinado vertical marca VIWA brinda gran robustez para el mecanizado de materiales metálicos, y es capaz de interpretar códigos G y M estándares, y estimar el tiempo de maquinado. Como accesorios adicionales ofrece: generador manual de pulsos (MPG), medidor de altura de herramienta y palpador [27].



Figura 2.7. Centro de mecanizado VCM3-M400 de la empresa VIWA
(Fuente: [27])

Tabla 2.5. Especificaciones de Centro de Mecanizado VCM3-M400

Empresa		VIWA	
Modelo		VCM3-M400	
Recorrido	Eje x	475	Mm
	Eje y	300	Mm
	Eje z	350	Mm
Avance	Eje x/y	20	m/min
	Eje z	20	m/min
Rango de velocidad (husillo)		100-8000	Rpm
Capacidad de herramientas		12	U
Potencia instalada (Servomotores)		2	kW
Potencia instalada (husillo)		5	HP

(Fuente: [27])

2.2.2.2.3. Importadoras Nacionales

Debido a la carente producción de maquinaria industrial en el país, diferentes empresas se dedican a la importación de equipos CNC para el mecanizado de piezas metálicas. A continuación se hace referencia a dos empresas con marcada trayectoria en el país, y a las principales marcas que maquinaria CNC que comercializan.

2.2.2.2.3.1. Comercializadora BKB Ecuador.

BKB Maquinaria Industrial ofrece equipos de las marcas HAAS (Oxnard, EEUU), Travis (Polinyá, Barcelona-España) y DMTG (China). [28]

- Marca TRAVIS CNC modelo: MM-4

Es un centro de mecanizado CNC vertical compacto y versátil que incluye control numérico Fagor 8055, guías lineales, roscado rígido, engrase automático y centralizado, volante electrónico o salida RS-232 entre otros. Es una máquina herramienta compacta para trabajo en todo tipo de materiales. [29]



Figura 2.8. Centro de mecanizado TRAVIS CNC MM-4.
(Fuente: [29])

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del Centro de mecanizado TRAVIS CNC MM-4.

Empresa		TRAVIS CNC	
Modelo		MM-4	
Recorrido	Eje x	400	mm
	Eje y	200	mm
	Eje z	375	mm
Avance	Eje x/y	1 a 15000	mm/min
	Eje z	1 a 15000	mm/min
Rango de velocidad (husillo)		1 a 8000	rpm
Capacidad de herramientas		8	U
Potencia instalada (husillo)		8	HP

(Fuente: [29])

- **Marca HAAS modelo VF-2**

Se trata de un centro de mecanizado vertical, de acoplamiento directo, posee un cambiador de herramientas automático de 20 estaciones de tipo carrusel y avances rápidos de 25,4 m/min. Además posee un módulo de detección de fallos eléctricos, y llave para bloquear la memoria. Incluye sistema de roscado rígido y de refrigeración por inmersión.[30]

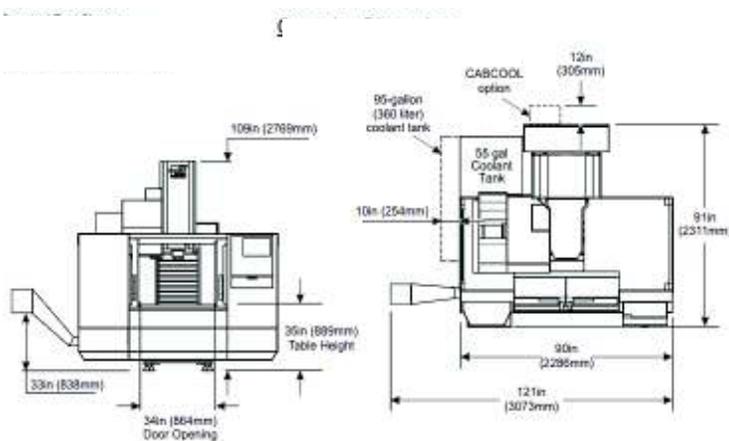


Figura 2.9. Centro de Mecanizado VF-2 de HAAS.
(Fuente: [30])

Tabla 2.7. Especificaciones de centro de Mecanizado VF-2 de HAAS

Empresa		HAAS	
Modelo		VF-2	
Recorrido	Eje x	762	mm
	Eje y	406	mm
	Eje z	508	mm
Avance	Eje x/y	25.4	m/min
	Eje z	25.4	m/min
Rango de velocidad (husillo)		8100	rpm
capacidad de herramientas		20	u
Potencia instalada (husillo)		30/22,4	hp/kW

(Fuente:[30])

2.2.2.2.3.2. Comercializadora TECHDESIGN Ecuador

TECHDESIGN Ecuador es una empresa que tiene como misión proveer de servicios de calidad al mercado ecuatoriano para implementar y adaptar nueva tecnología, y mejorar así la calidad de productos y servicios que requiere la industria ecuatoriana. TECHDESIGN Ecuador es la principal comercializadora de máquinas CNC de la marca GSK. [31]

- **Marca GSK modelo:XK7145A**

Es un centro de mecanizado CNC vertical que incluye sistema de cambio de herramienta tipo revolver automático, puede alcanzar velocidad de hasta 8000[rpm]. Tiene un sistema de detección de fallos eléctricos y sistema de refrigeración por inmersión. [31]



Figura 2.10. Centro de mecanizado XK 7145A de la empresa GSK.
(Fuente: [31])

Tabla 2.8. Especificaciones de Centro de Mecanizado XK 7145A.

Empresa		GSK	
Modelo		XK7145A	
Recorrido	Eje x	600	Mm
	Eje y	450	Mm
	Eje z	460	Mm
Avance	Eje x/y	12	m/min
	Eje z	10	m/min
Rango de velocidad (husillo)		6000	rpm
Capacidad de herramientas		16	U
Potencia instalada (husillo)		5,5	kW
Controlador		Fanuc Oi-MD Siemens 828D	

(Fuente: [31])

2.2.2.2.4. Resultados del Benchmarking

La información obtenida del benchmarking, se incluye en la Tabla 2.9 siguiendo el siguiente orden:

- Columna A: Evaluación de cumplimiento del producto de la empresa. Debido a que el producto se encuentra en una etapa de diseño y no se ha materializado, se fija un valor de 1 con respecto a cada una de las demandas.
- Columna B: Evaluación del cumplimiento de los productos de la competencia 1. En este caso se refiere al equipo de marca GSK, modelo XK7145A, comercializado por TECHDESIGN Ecuador.

- Columna C: Evaluación del cumplimiento de los productos de la competencia 2. En este caso se refiere al equipo de marca TRAVIS CNC, modelo MM-4, comercializado por BKB Ecuador.
- Columna D: Objetivos a cumplir en relación a las demandas de los clientes (fijación del nivel deseado, de 1 a 5).
- Columna E: Índice de mejora (indica el grado de mejora que la empresa se propone para cada demanda, $E=D/A \geq 1$).
- Columna F: Factor de venta (evaluación en niveles 1/1,2/1,5).
- Columna G: Importancia (a partir de respuestas de los usuarios, de 1 a 5).
- Columna H: Ponderación ($H=E \cdot F \cdot G$).
- Columna I: Ponderación porcentual (en % sobre el total de las demandas) [22].

Tabla 2.9. Análisis de la competencia o Benchmarking.

N° Demanda	Propia Empresa (A)	Competencia 1 (B)	Competencia 2 (C)	Objetivos (D)	Índice de mejora (E)	Factor de venta (F)	Importancia (G)	Ponderación (H)	Ponderación [%] (I)
1	1	5	4	4	4	1,2	3	14,40	8,32
2	1	4	4	3	3	1,2	4	14,40	8,32
3	1	5	4	3	3	1	2	6,00	3,47
4	1	2	2	3	3	1,5	5	22,50	13,00
5	1	4	4	5	5	1	4	20,00	11,56
6	1	3	3	3	3	1	2	6,00	3,47
7	1	3	3	3	3	1	3	9,00	5,20
8	1	4	4	4	4	1,2	4	19,20	11,09
9	1	4	4	5	5	1,5	5	37,50	21,68
10	1	4	4	4	4	1,5	4	24,00	13,87

(Fuente: Propia)

Del análisis de la competencia, según la Tabla 2.9, con un valor mayor de ponderación, los criterios más importantes para el diseño son: la vida útil de la máquina, la seguridad, y el precio.

2.2.2.3. Voz del ingeniero

En este apartado, los requerimientos, necesidades y exigencias del usuario se traducen a un lenguaje técnico, con variables medibles o cuantificables, para posteriormente definir las especificaciones técnicas del sistema diseñado. Las características técnicas se definen en la

Tabla 2.10

Tabla 2.10. Requerimientos técnicos.

N°	Característica técnica	Unidad
1	Volumen de la máquina	[m ³]
2	Velocidades de trabajo de motores	[rpm]
3	Número de posibles herramientas a usarse (multi-herramienta)	[-]
4	Costo de fabricación	[\$]
5	Resistencia mecánica de los materiales	[MPa]
6	Tiempo de paro por mantenimiento	[-]
7	Potencia eléctrica consumida	[kW]
8	Tolerancias	[mm]
9	Tiempo de garantía	[años]
10	Cumplimiento de normas de seguridad	[-]

(Fuente: Propia)

2.2.2.4. Correlaciones

En este punto se desarrolla el cuerpo de la casa de la calidad y se evalúa la capacidad de cada característica técnica para satisfacer las demandas del usuario [22].

Se establecen tres niveles relacionados con la posibilidad de satisfacer las demandas a partir de las características técnicas. Los niveles de correlación son: fuerte, mediano y débil, con los valores de 9, 3 y 1 asignados a cada nivel respectivamente.

Tabla 2.11. Correlaciones entre demandas y características técnicas.

Característica Técnica \ Demandas	Volumen	Velocidad de motores	Multi-Herramienta	Costo de fabricación	Resistencia mecánica	Tiempo paro por mantenimiento	Potencia eléctrica de motores	Tolerancias	Tiempo de garantía	Cumplimiento norma de seguridad
Compacta	9	0	0	0	0	3	0	0	1	0
Desplazamiento rápido	0	9	0	0	0	0	3	0	0	0
Pota-herramientas versátil	0	0	9	0	0	1	0	0	0	0
Bajo Costo	1	0	1	9	0	0	1	0	3	0
Estructura estable	0	0	0	0	9	0	0	0	0	1
Fácil mantenimiento	1	0	1	0	0	9	0	0	0	0
Bajo consumo de energía	0	1	0	0	0	0	9	0	0	0
Precisa	0	3	0	0	0	0	1	9	0	0
Vida útil elevada	0	0	0	3	1	1	0	0	9	0
Operación segura	0	3	0	0	1	0	0	0	1	9

(Fuente: Propia)

2.2.2.5. Evaluación Técnica

Este punto consiste en la evaluación de la incidencia de las características técnicas en la satisfacción de las demandas del cliente. Para calcular este valor se hace uso de la Ecuación (2.1) [22].

$$Incidencia = \sum I_d * S_{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

I_d = factor de Incidencia

S_{dt} = Valor de la ponderación

Ejemplo de cálculo.

Característica técnica: Volumen de la máquina

$$Incidencia = \sum I_d * S_{dt}$$

$$Incidencia = 9 * 14,4 + 22,5 + 6 = 158,1$$

$$Incidencia Porcentual = \frac{158,1}{2224,1}$$

$$Incidencia Porcentual = 7,11 \text{ [%]}$$

Tabla 2.12. Resultados de la evaluación técnica de las demandas del cliente.

Demandas	Volumen	Velocidad de motores	Multi-Herramienta	Costo de fabricación	Resistencia mecánica	Máquina modular	Potencia eléctrica de motores	Tolerancias	Tiempo de garantía	Cumplimiento norma de seguridad	Total
Incidencia	158,10	268,20	82,50	315,00	241,50	140,70	165,90	172,80	443,40	236	2224
Incidencia Porcentual	7,10	12,10	3,70	14,20	10,90	6,30	7,50	7,80	19,90	10,60	100

(Fuente: Propia)

2.2.2.6. Compromisos técnicos

El techo de la casa de la calidad contiene los distintos compromisos entre las características técnicas del producto que la empresa debe sopesar y decidir para situarse lo mejor posible en el mercado. Se ha establecido cuatro niveles de correlación: muy negativa, negativa, positiva, muy positiva.

Tabla 2.13. Correlación entre características técnicas.

	Muy negativa: MN	Negativa: N	Positiva: P	Muy Positiva: MP						
Características Técnicas	Volumen	Velocidad de motores	Multi-Herramienta	Costo de fabricación	Resistencia mecánica	Máquina modular	Potencia eléctrica de motores	Tolerancias	Tiempo de garantía	Cumplimiento norma de seguridad
Volumen				P	N				MP	
Velocidad de motores				N			MP			
Multi-Herramienta						P				
Costo de fabricación	P	N			MN				N	
Resistencia mecánica	N			MN						
Máquina modular			P							
Potencia eléctrica de motores		MP								
Tolerancias										
Tiempo de garantía	MP			N						P
Cumplimiento norma de seguridad									P	

(Fuente: Propia)

2.2.3. Resultados – Casa de la Calidad

Para poder obtener resultados útiles, es necesario organizar los datos antes obtenidos de tal forma que permita transformar lo pedido por el cliente en requisitos técnicos estipulados por el diseñador. Después se realiza un análisis y comparación con la competencia establecida lo cual permite visualizar los principales aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de realizar el diseño.

La competencia tomada en consideración es la siguiente:

- Competencia 1: GSK XK7145A
- Competencia 2: TRAVIS CNC MM-4

El esquema de resumen de la casa de la calidad puede visualizarse de manera detallada en ANEXO I.

Como parte de los resultados obtenidos en la casa de la calidad y el análisis de la competencia se realizó una tabla de especificaciones técnicas (Tabla 2.14) la cual es una guía de diseño que presenta características y prestaciones de la máquina a ser diseñada.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas.

Empresa cliente: Particular	Producto: Mecanismos de posicionamiento y desplazamiento en 3 dimensiones de la herramienta en una máquina CNC			Fecha inicial: 30/11/2017 Última revisión: 12/01/2018
Diseñado por: Darwin Jiménez Y Marco Páez				Página 1/1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	19/01/2018	C + I	R	Desplazar y posicionar la herramienta de trabajo de una máquina CNC.
Dimensiones	19/01/2018	C+I	D	Recorrido de trabajo: X= 800 mm; Y= 600 mm Z= 350 mm
Movimientos	19/01/2018	C+I	R	Desplazamiento de la herramienta en 3 dimensiones (XYZ).
	19/01/2018	I	R	Velocidad de avance rápido en cada eje: X= 12 m/min, Y= 12 m/min, Z= 12 m/min [29][31].
	19/01/2018	C+I	R	Precisión posicionamiento de la herramienta: $\pm 0,05$ mm [29][31][32].
Fuerzas	19/01/2018	I	R	Fuerza de desbaste (planeado)
				Fuerza de corte transversal Fuerza de corte longitudinal
Energías	19/01/2018	C+I	R	Alimentación de material manual.
	19/01/2018	I	MR	Accionamientos mecánicos
	19/01/2018	I	R	Automatización con PLC
Materiales	19/01/2018	I	R	Materiales existentes en el mercado.
	19/01/2018	C+I	R	Materiales a trabajar: Aceros de bajo contenido de Carbono
Mantenimiento y vida útil	30/10/2017	C+I	R	Garantía de un año
Aspectos Legales	30/10/2017	C+I	R	Cumpla con norma ANSI B11.0
	30/10/2017	C+I	R	Decreto 2393-Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo

(Fuente: Propia)

C= Cliente; I= ingeniería

R= Requerimiento; MR= Modif. Requerimientos; NR= Nuevo requerimiento; D= Deseo

2.3. Solución para cada módulo

En la Tabla 2.15 se puede observar los módulos considerados al momento de diseñar la máquina CNC.

Tabla 2.15. Módulos considerados para el diseño de la máquina CNC.

Módulo	Definición
Módulo 1: Sujeción	Módulo que asegura una sujeción correcta, tanto de la pieza de trabajo como de la herramienta de trabajo.
Módulo 2: Control	Es el módulo encargado de controlar toda acción que realiza la máquina, se trata de todo lo requerido para realizar la automatización de la máquina.
Módulo 3: Guía de movimiento	Módulo encargado de guiar el movimiento de los diferentes carros (X,Y,Z), es decir mantener recto el movimiento de cada eje. Además las guías de movimiento soportaran las cargas realizadas al momento de trabajo.
Módulo 4: Transmisión de movimiento	Este módulo debe asegurar la transmisión de movimiento desde los motores a los carros de los diferentes ejes, la transmisión de movimiento debe ser tal que permita tener el torque suficiente para el trabajo a ser realizado.

(Fuente: Propia)

2.3.1. Módulo 1: Sujeción

Este primer módulo es el encargado de proporcionar una correcta sujeción tanto de la herramienta de corte como del material en bruto a trabajarse; adicionalmente la solución ser adaptable a las diferentes herramientas de corte para las diferentes operaciones de mecanizada, así como a los diferentes geometrías del material a trabajar.

2.3.1.1. Sujeción de la herramienta de corte

En lo que respecta a la fijación de la herramienta de trabajo, se realiza un análisis de selección del cabezal de fresado, o spindle CNC (husillo), de acuerdo a la potencia necesaria de corte. La selección del cabezal de fresado restringe el diseño de partes para la sujeción/acople de la herramienta de corte. En su mayoría, los spindle CNC tienen un sistema propio de sujeción dependiendo de la herramienta de corte. Por tanto, el diseño deberá ajustarse al sistema de sujeción del cabezal de fresado seleccionado en la Subsección 2.4.5.1.2.



Figura 2.11. Modelo CAD de un husillo de corte.
(Fuente: [33])

2.3.1.2. Mesa de trabajo

Con el fin de tener una sujeción modular, que permita el uso de diferentes alternativas de solución para la sujeción de la pieza de trabajo, se opta por el uso de una mesa de trabajo con canales tipo T (Figura 2.12).

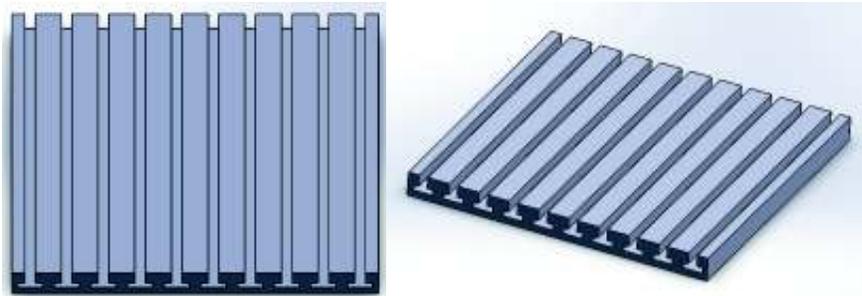


Figura 2.12. CAD de Mesa de trabajo con canales tipo T.
(Fuente: Propia)

Ventajas

- La mesa de trabajo con canales es compatible con una gran variedad de alternativas para la sujeción de la pieza a la mesa de trabajo.
- Variedad de geometrías para los canales de la mesa de trabajo.
- Materiales usados como el hierro fundido templados, revenidos y rectificadas permite soportar esfuerzos libres de deformación a lo largo de su vida útil [34].

Desventajas

- Materiales de desecho del mecanizado suelen alojarse en los canales de la mesa y generar interferencia con los mecanismos de sujeción.
- Es necesario una limpieza continua de los canales de la mesa
- La geometría de los canales y los sujetadores deben de ser similares para evitar juegos en la sujeción

2.3.1.3. Sujeción de la pieza a la mesa de trabajo

La fuerza que ejerce el sistema de sujeción debe garantizar que las fuerzas de corte no desplacen a la pieza de trabajo. El sistema de sujeción debe ser acoplado de tal manera que no represente un peligro de impacto mientras la herramienta de corte realiza el proceso de desbaste.

Adicionalmente, el ajuste de las piezas no debe tomar mucho tiempo [35]. Como alternativas para la sujeción de la pieza de trabajo se tiene: tornillos, tuercas y bridas de apriete, mandriles de mordaza, y mordazas de apriete.

2.3.1.3.1. Tornillos, tuercas y bridas de apriete

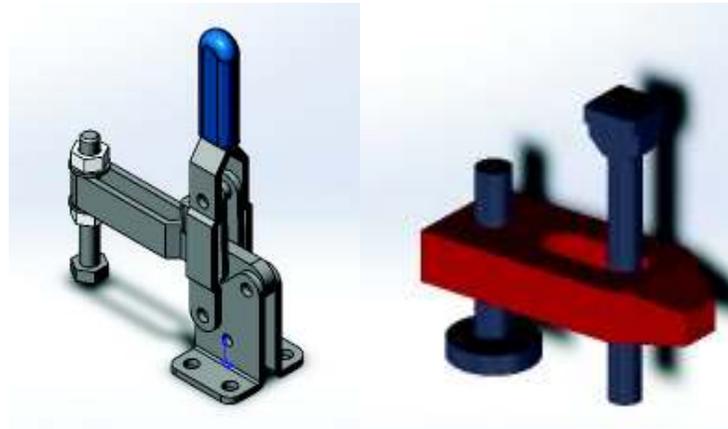


Figura 2.13. Tornillos, tuercas y bridas de apriete.
(Fuente: [33])

Ventajas

- Facilidad de montaje y desmontaje.
- Bajo costo.
- Componentes del sistema pueden reemplazarse con facilidad.

Desventajas

- No se tiene un control de la fuerza de sujeción (posible deformación de la pieza de trabajo)
- A pesar de la facilidad de montaje y desmontaje de los componentes individuales del sistema, debido al uso de dos o más tuercas y tornillos, o bridas de sujeción, el tiempo de ajuste es considerable [36].
- No es posible garantizar el paralelismo de la mordaza con la mesa de trabajo (Figura 2.14) [35].

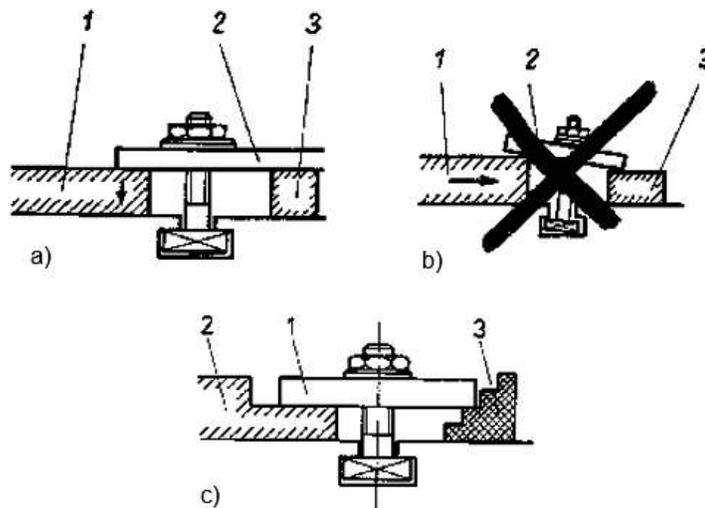


Figura 2.14. Formas correcta e incorrecta de sujeción por tornillos, tuercas y bridas de apriete.
(Fuente: [35])

La Figura 2.14(a) indica el modo correcto de sujeción de la pieza de trabajo con tuercas y tornillos. La Figura 2.14(b) muestra el fallo producido por la falta de paralelismo entre la pieza y la mesa de trabajo. Para solucionar un fallo de paralelismo, se puede recurrir a un sistema de apoyo, con el cual se regula la altura donde se asienta la mordaza como se muestra en la Figura 2.14(c).

2.3.1.3.2. Mandril de mordazas

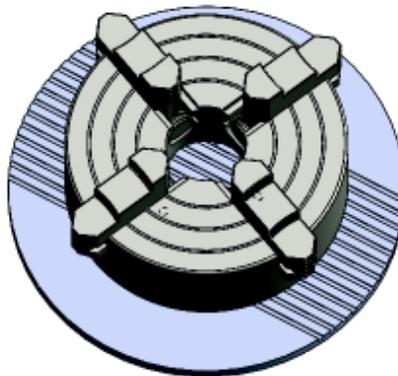


Figura 2.15. Mandril de mordazas.
(Fuente: [33])

Ventajas

- El mandril de mordazas provee una excelente sujeción de pieza de trabajo a la vez que evita su desplazamiento
- Una vez realizada la sujeción se tiene un centrado automático de las piezas de geometría cilíndrica con respecto al mandril de mordazas
- Permite aplicar fuerzas relativamente grandes para la sujeción

Desventajas

- Su uso se limita a piezas de revolución en bruto y simétricas de varias aristas. [35]
- Usualmente usado para piezas de pequeña geometría (diámetros)
- No recomendable para materiales blandos, debido a la gran fuerza que provee el mandril (posible deformación de la pieza de trabajo)

2.3.1.3.3. Mordazas de apriete

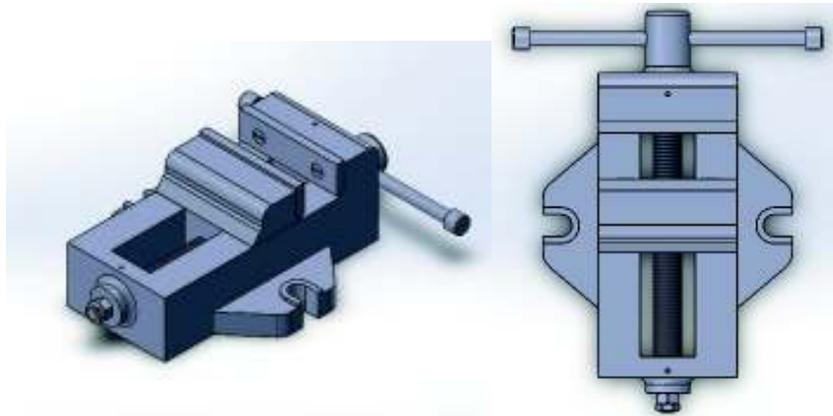


Figura 2.16. CAD Mordazas de apriete.
(Fuente: [33])

Ventajas

- Sistema sencillo y de fácil uso
- Las mordazas de apriete ofrecen una buena sujeción a piezas de geometría prismáticas [36].
- Rapidez de montaje y desmontaje de piezas de trabajo
- Mordazas de apriete giratorias son capaces de girar la pieza de trabajo de manera controlada, de acuerdo a una escala angular

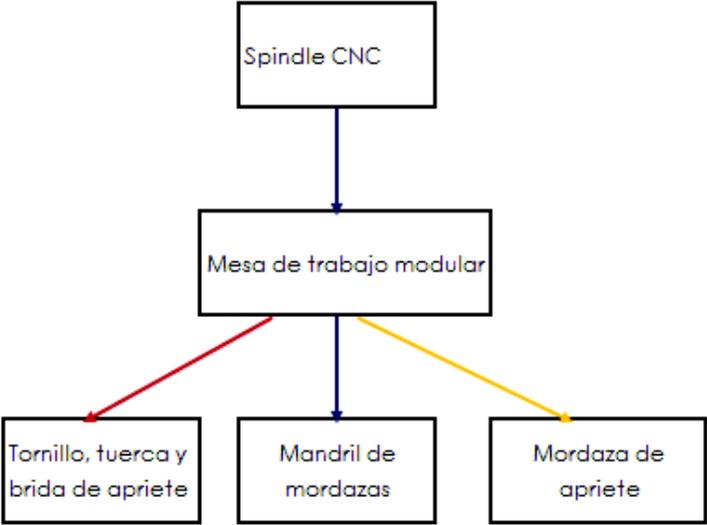
Desventajas

- No se tiene un control de la fuerza de sujeción (posible deformación de la pieza de trabajo)
- Las dimensiones máximas de la pieza a mecanizar dependen de las dimensiones máximas de la mordaza.
- Necesidad de tener dos caras paralelas para la sujeción en la pieza de trabajo.

Para encontrar una solución bajo el método de criterios ponderados, es necesario presentar alternativas que ayuden a cumplir el objetivo, para después realizar una

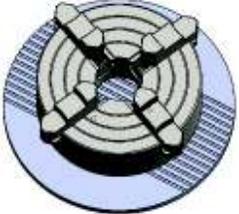
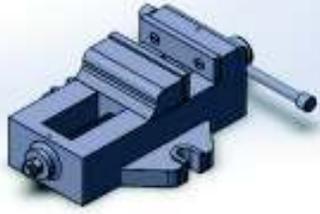
evaluación que permita la selección de la mejor alternativa para cada módulo [22]. Éste proceso de análisis se muestra a continuación:

Tabla 2.16. Alternativas de solución del módulo de sujeción.

Funciones	Soluciones
Proporciona movimiento rotacional de corte y correcta sujeción a herramienta	
Permite acoplar diferentes soluciones de sujeción de pieza de trabajo	
Sujeción de la pieza de trabajo	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Gráficas de alternativas de solución del módulo de sujeción.

Funciones	Soluciones		
Proporciona movimiento rotacional y sujeta la herramienta de corte			
Permite acoplar diferentes soluciones de sujeción			
Sujeción de la pieza de trabajo			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"></div> <div style="width: 65%;">Alternativa 1: Spindle CNC, mesa de trabajo modular y, tornillos, tuercas y bridas de apriete</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"></div> <div style="width: 65%;">Alternativa 2: Spindle CNC, mesa de trabajo modular y, mandril de mordazas</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"></div> <div style="width: 65%;">Alternativa 3: Spindle CNC, mesa de trabajo modular y, mordaza de apriete</div> </div>			

(Fuente: Propia)

Además de presentar alternativas de diseño, resulta necesario establecer criterios de evaluación para cada módulo. Dichos criterios permitirán evaluar objetivamente cada una de las alternativas presentadas y así seleccionar la mejor opción.[22]

Tabla 2.18. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de sujeción.

Criterios	Descripción
Fuerza de sujeción	Magnitud de la fuerza que puede ejercer el sistema sobre el elemento a sujetar
Tiempo de montaje y desmontaje	Tiempo que tome el montaje, y posterior desmontaje del sistema que ejerce la fuerza de sujeción sobre el elemento a maquinarse.
Costo	Costo de adquisición o fabricación del sistema
Riesgo de impacto	Criterio que considera la probabilidad de que la herramienta sufra un choque contra el sistema de fijación y la gravedad de dicho choque.

(Fuente: Propia)

Una vez establecidos los criterios de evaluación y las posibles alternativas de solución para los módulos del sistema o máquina a diseñarse, se debe realizar las ponderaciones de dichos aspectos. Para la ponderación de los criterios de evaluación se hace uso de tablas donde cada criterio se confronta a los criterios restantes asignando los siguientes valores:

- 1: Si el criterio de las filas es superior, o mejor que el de las columnas.
- 0,5: Si el criterio de las filas es igual o equivalente al de las columnas.
- 0: Si el criterio de las filas es inferior o menor al de las columnas.

Luego se suma los valores asignados a cada criterio más 1 y se calcula la ponderación que recibió cada criterio [22].

Tabla 2.19. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de sujeción.

Criterio D > Criterio C > Criterio A = Criterio B						
	Fuerza de sujeción	Tiempo de sujeción y soldadura	Costo	Riesgo de Impacto	Suma + 1	Ponderación
Fuerza de Sujeción		1	0	0	2	0,200
Tiempo de sujeción y soldadura	0		0	0	1	0,100
Costo	1	1		0	3	0,300
Riesgo de Impacto	1	1	1		4	0,400
				Total	10	1

(Fuente: Propia)

De igual manera se debe evaluar las alternativas bajo cada criterio y ponderar las mismas de la misma forma que con los criterios.

Tabla 2.20. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Fuerza de sujeción.

Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 1					
Fuerza de Sujeción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		0	0	1	0,167
Alternativa 2	1		0,500	2,500	0,417
Alternativa 3	1	0,500		2,500	0,417
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.21. Criterios ponderados alternativas sujeción vs tiempo de sujeción y soldadura.

Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1					
Tiempo de montaje y desmontaje	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0,167
Alternativa 2	1		0	2	0,333
Alternativa 3	1	1		3	0,500
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.22. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Costo.

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2					
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		1	1	3	0,500
Alternativa 2	0		0	1	0,167
Alternativa 3	0	1		2	0,333
Total				6	1

(Fuente: propia)

Tabla 2.23. Criterios ponderados alternativas sujeción vs Riesgo de Impacto.

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3					
Riesgo de Impacto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		1	1	3	0,500
Alternativa 2	0		0,500	1,500	0,250
Alternativa 3	0	0,500		1,500	0,250
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Por último, para completar la evaluación, se suma la ponderación de cada alternativa (evaluada bajo cada uno de los criterios), multiplicada por la ponderación de cada criterio, y se obtiene los pesos específicos de cada alternativa.[22]

Tabla 2.24. Conclusión de criterios ponderados para alternativas del módulo de sujeción.

Conclusiones	Fuerza de Sujeción	Tiempo de sujeción y soldadura	Costo	Riesgo de Impacto	Suma	Prioridad
Alternativa 1	0,033	0,017	0,150	0,200	0,400	1
Alternativa 2	0,083	0,033	0,050	0,100	0,267	3
Alternativa 3	0,083	0,050	0,100	0,100	0,333	2

(Fuente: Propia)

Para el módulo de sujeción se tiene como principal prioridad a utilizarse la Alternativa 1, seguido de la Alternativa 3 y por último la Alternativa 2.

El método de criterios ponderados se utilizará en todos los módulos a ser evaluados para obtener la mejor solución global.

2.3.2. Módulo 2: Control

Para el módulo de control automático se consideraron varias opciones de plataformas electrónicas de hardware y software. Entre estas opciones cabe mencionar las placas Arduino y Raspberry PI, cuyas plataformas de software ofrecen librerías especializadas para trabajar con máquinas CNC. En términos de software, otra opción es el uso de MACH 3, software que al ser instalado en una computadora permite brinda una forma para el control de motores a paso o servomotores de una máquina CNC al conectar los mismos mediante un puerto paralelo [37].

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación ha sido aprobado previamente el uso de un controlador lógico programable (PLC). Por lo cual no se realizará un análisis de

alternativas para el presente módulo, ya que tendría una solución única. A continuación se enlistan las ventajas y las desventajas de utilizar un PLC [38].

Ventajas:

- Un PLC está diseñado para soportar condiciones ambientales adversas.
- Es fácil de instalar
- Tiene un consumo de energía mínimo
- Flexibilidad Control de procesos complejos
- Facilidad de programación

Desventajas:

- Requiere personal especializado (Realizar planteamiento y programación)
- Se centraliza el proceso (Si algo sale mal todo el proceso se ve comprometido)
- Costo alto si se requiere controlar tareas pequeñas o sencillas.

2.3.3. Módulo 3: Guía de movimiento

El módulo de guía de movimiento permite a la máquina CNC desplazarse por una trayectoria deseada, en este desplazamiento se debe de disminuir en la mayor cantidad posible cualquier tipo de rozamiento ya que este demanda un mayor trabajo de la máquina para el movimiento.

2.3.3.1. Guía de eje circular liso con rodamientos lineales

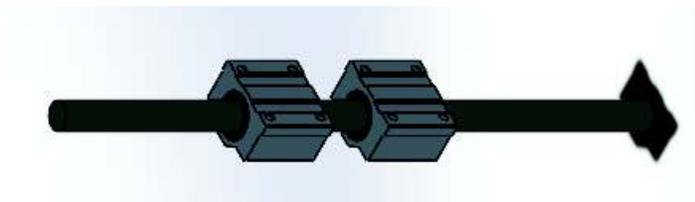


Figura 2.17. Guía de eje circular liso con rodamientos lineales.
(Fuente: Propia)

Ventajas

- Diseño simple.
- Bajo costo.
- Facilidad de montaje.
- Baja fricción al mover el carro conductor.

Desventajas

- El sistema no tiene la capacidad de soportar grandes cargas.
- Eje guía tiende a pandear por su propio peso si el eje es muy largo.
- Necesidad de tener más de un eje guía para garantizar estabilidad en el movimiento.
- Dificultad de acoplamiento a carro conductor.

2.3.3.2. Guía prismática y acople prismático

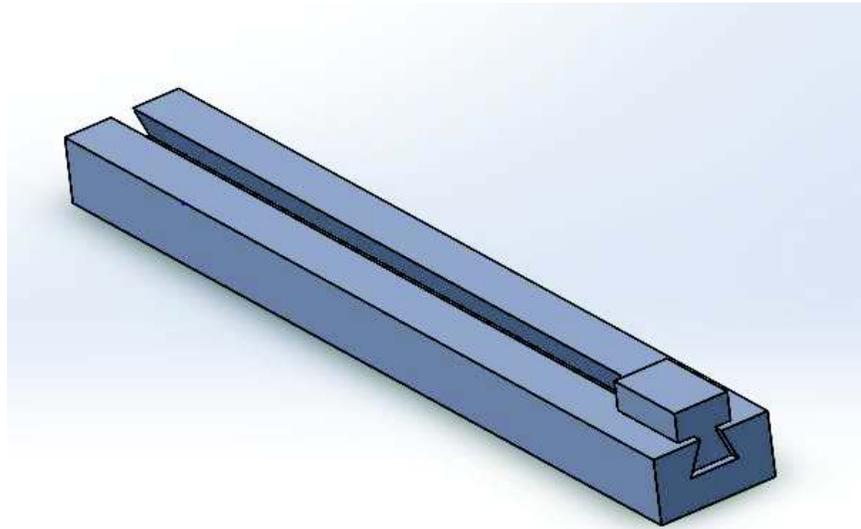


Figura 2.18. Guía prismática y acople prismático.
(Fuente: Propia)

Ventajas

- El sistema es capaz de soportar grandes cargas.
- Se garantiza estabilidad de movimiento con un solo eje guía.
- Guía prismática no se deforma o pandea por su propio peso u otras cargas.
- Facilidad de acoplamiento a carro conductor.

Desventajas

- Presenta alta fricción, es decir, se requerirá mayor fuerza para mover el carro conductor.
- Necesidad de lubricación constante.
- Alto costo.
- Fabricación complicada.

2.3.3.3. Guía de tubo cuadrado o perfil U con ruedas y rodamientos radiales

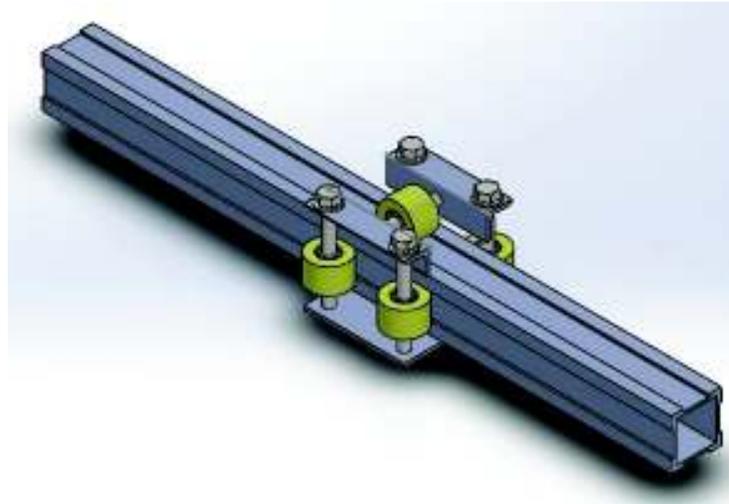


Figura 2.19. Guía Tubo cuadrado o perfil U con ruedas y rodamientos radiales
(Fuente: Propia)

Ventajas

- Baja fricción.
- Bajo costo
- No requiere lubricación constante.

Desventajas

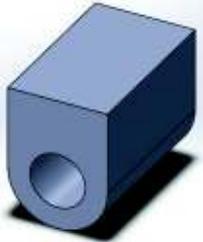
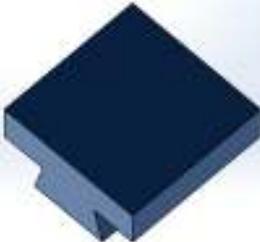
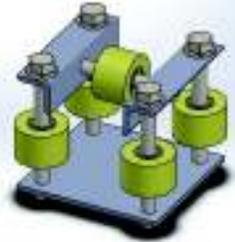
- Difícil acople a carro conductor.
- Se puede pandear por cargas altas.
- Soporta cargas medias.
- Posibilidad de tener errores de alineamiento

Tabla 2.25. Alternativas de solución del módulo de guía de movimiento.

Funciones	Soluciones		
Acople entre Eje guía y carro de movimiento	Rodamiento lineal	Acople prismático	Ruedas y Rodamientos radial
Tipo de eje guía	Eje circular	Eje prismático	Tubo cuadrado o perfil guía

(Fuente: Propia)

Tabla 2.26. Figuras de alternativas de solución del módulo de guía de movimiento.

Funciones	Soluciones		
Acople entre Eje guía y carro de movimiento			
Tipo de eje guía			
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="margin-left: 10px;"> <p>Alternativa 1: Eje circular con rodamientos lineales</p> <p>Alternativa 2: Eje prismático con acople prismático</p> <p>Alternativa 3: Tubo cuadrado o perfil U guía con ruedas y rodamientos radiales</p> </div> </div>			

(Fuente: Propia)

Tabla 2.27. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de guía de movimiento.

Criterios	Descripción
Fuerza	Fuerza que debe proveer el motor para desplazar el carro sobre las guías.
Carga	Carga mecánica que puede soportar
Costo	Costo de materiales a usarse y su maquinado
Vida Útil	Resistencia a fatiga, corrosión y al paso del tiempo

(Fuente: Propia)

Tabla 2.28. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de guía de movimiento.

Criterio C = Criterio D > Criterio B > Criterio A

	Fuerza	Carga	Costo	Vida Útil	Suma + 1	Ponderación
Fuerza		0,500	0	0	1,500	0,150
Carga	0,500		0	0,500	2	0,200
Costo	1	1		0,500	3,500	0,350
Vida útil	1	0,500	0,50		3	0,300
				Total	10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.29. Criterios ponderados alternativas de guía vs Fuerza.

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2					
Fuerza	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	0,500	2,500	0,420
Alternativa 2	0		0	1	0,170
Alternativa 3	0,500	1		2,500	0,420
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.30. Criterios ponderados alternativas de guía vs Carga.

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1					
Carga	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0,170
Alternativa 2	1		0,500	2,500	0,420
Alternativa 3	1	0,500		2,500	0,420
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.31. Criterios ponderados alternativas de guía vs Costo.

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2					
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,500
Alternativa 2	0		0	1	0,170
Alternativa 3	0	1		2	0,330
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.32. Criterios ponderados alternativas de guía vs Vida útil.

Alternativa 2 > Alternativa 1 = Alternativa 3					
Vida Útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	0,500	1,500	0,250
Alternativa 2	1		1	3	0,500
Alternativa 3	0,500	0		1,500	0,250
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.33. Conclusión de criterios ponderados para módulo de guía de movimiento.

Conclusiones	Precisión	Velocidad	Costo	Vida Útil	Suma	Prioridad
Alternativa 1	0,06	0,030	0,180	0,080	0,350	1
Alternativa 2	0,03	0,080	0,060	0,150	0,320	3
Alternativa 3	0,06	0,080	0,120	0,080	0,340	2

(Fuente: Propia)

2.3.4. Módulo 4: Transmisión de movimiento

Este módulo es el encargado de transformar el movimiento rotacional proveniente de los motores en movimiento de traslación de nuestra herramienta de trabajo bajo los requerimientos de precisión y potencia necesarios.

2.3.4.1. Piñón cremallera

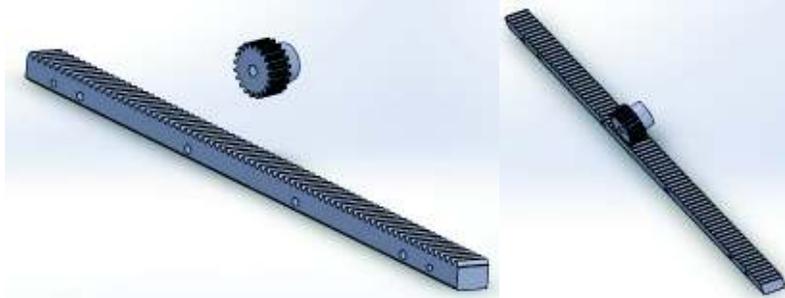


Figura 2.20. Mecanismo Piñón Cremallera
(Fuente: Propia)

Ventajas

- Elemento de giro reversible
- Gran precisión de posicionamiento

Desventajas

- Sensibilidad a impactos.
- Sensibilidad a vibraciones.
- Sistema no suele ser usado en grandes rangos de movimiento.
- Sistema no recomendado para altas velocidades.
- Necesidad de lubricación.

2.3.4.2. Tornillo de potencia



Figura 2.21. Tornillo de Potencia Rosca ACME
(Fuente: Propia)

Ventajas

- Posicionamiento preciso de un movimiento axial [39].
- Fabricación con materiales de gran resistencia [40].
- Larga vida útil.
- Un tornillo de potencia permite obtener gran ventaja mecánica, por esta razón suele verse este sistema en gatas, abrazaderas y prensas [41].

Desventajas

- Eficiencia depende del ángulo de avance. Debido a rozamientos entre el tornillo y la tuerca se obtienen valores de eficiencia del 89% [42]. Esta desventaja suele solventarse con el uso de acoples antibacklash.

Dentro del análisis de esta alternativa se propone hacer uso de husillos de bolas recirculantes, estos presentan una mayor eficiencia que los tornillos de potencia comunes, debido a reducen en gran medida la fricción entre el tornillo y la tuerca (Véase Figura 2.22). Los husillos de bolas utilizan en la tuerca un sistema de recirculación de bolas, que actúan de manera similar a rodamientos reduciendo la fricción.



Figura 2.22. Eficacia de transmisión de potencia entre husillo de bolas vs husillo ACME. (Fuente: [43])

2.3.4.3. Transmisión por bandas dentadas

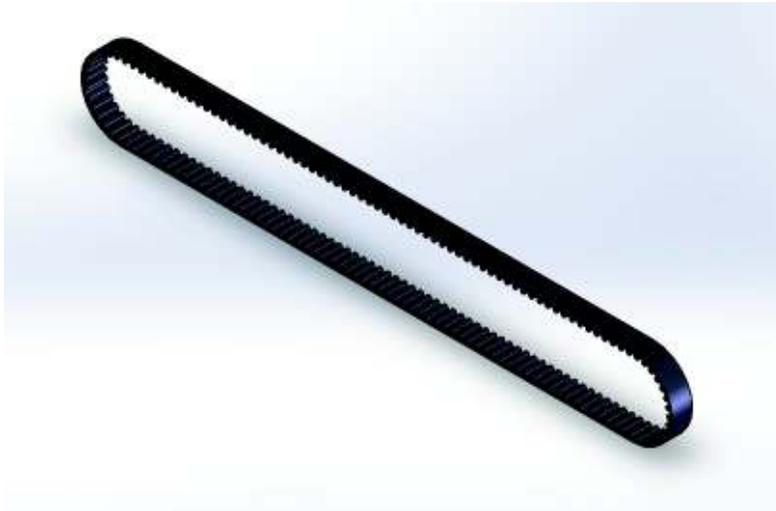


Figura 2.23. Banda dentada
(Fuente: Propia)

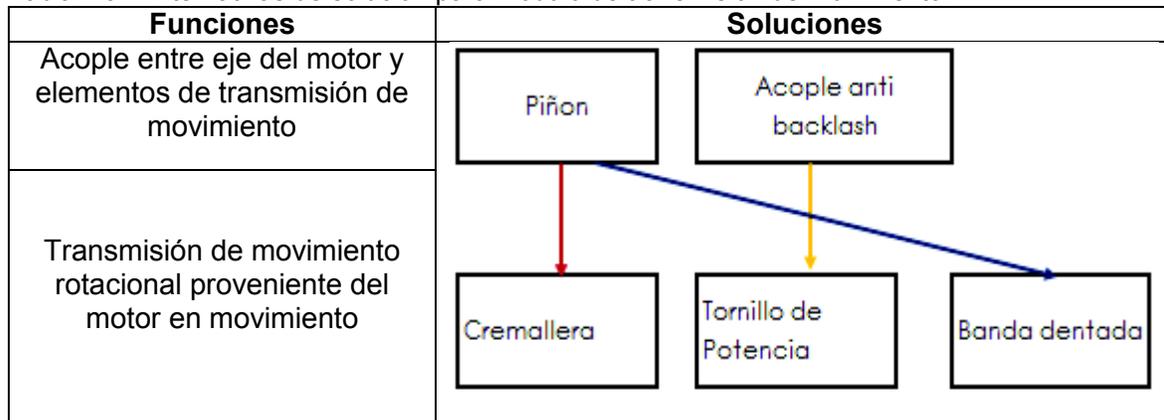
Ventajas

- Las bandas son excelentes para transmitir potencia a distancias comparativamente largas [44]
- Diseño simple [44]
- Costos reducidos [44]
- Absorción de cargas de impacto [44]
- Transmisión suave y silenciosa [40]
- Fácil montaje y diseño [40]

Desventajas

- Necesidad de mantenimiento constante [40].
- Reemplazo necesario ante la primera señal de deterioro de la banda [44].
- Características de la banda de ven afectadas por el paso del tiempo y factores ambientales (suciedad) [40].
- No se deben usar cuando se requiera una sincronización absoluta entre bandas y poleas ya que su principio de funcionamiento se basa en la fricción (bandas planas).
- Sistema sujeto a deformación elástica debido a altas cargas.
- Sistema suele presentar pérdidas de potencia de 3 y 5 % [41].

Tabla 2.34. Alternativas de solución para módulo de transmisión de movimiento.



(Fuente: Propia)

Tabla 2.35. Gráficos correspondientes a las alternativas de solución para módulo de transmisión de movimiento.

Funciones	Soluciones		
Acople entre eje del motor y elementos de transmisión de movimiento			
Transmisión de movimiento rotacional proveniente del motor en movimiento			
	 Alternativa 1: Motor acoplado a cremallera piñon	 Alternativa 2: Motor con acople anti-backlash y tornillo de potencia	 Alternativa 3. Motor acoplado a piñon conductor y banda dentada

(Fuente: Propia)

Tabla 2.36. Criterios de evaluación para alternativas del módulo de transmisión de movimiento.

Criterios	Descripción
Exactitud	Posicionamiento programado vs real
Velocidad	Rapidez en el desplazamiento y desplazamiento
Costo	Costo de materiales a usarse y su maquinado.
Vida Útil	Resistencia a fatiga, corrosión y al paso del tiempo

(Fuente: Propia)

Tabla 2.37. Evaluación de criterios para análisis de alternativas del módulo de transmisión de movimiento.

Criterio A = Criterio B > Criterio C > Criterio D

	Exactitud	Velocidad	Costo	Vida Útil	Suma + 1	Ponderación.
Exactitud		1	1	1	4	0,400
Velocidad	0		0	0,500	1,500	0,150
Costo	0	1		1	3	0,300
Vida útil	0	0,500	0		1,500	0,150
Total					10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.38. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Precisión

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		0,500	1	2,50	0,420
Alternativa 2	0,500		1	2,500	0,420
Alternativa 3	0	0		1	0,170
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.39. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Velocidad.

Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1

Velocidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		0	0	1	0,170
Alternativa 2	1		0	2	0,330
Alternativa 3	1	1		3	0,500
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.40. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Costos.

Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1					
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		0	0	1	0,170
Alternativa 2	1		0	2	0,330
Alternativa 3	1	1		3	0,500
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.41. Criterio ponderado Alternativas de transmisión de movimiento vs Vida Útil.

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 3					
Vida Útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma + 1	Ponderación.
Alternativa 1		0	1	2	0,330
Alternativa 2	1		1	3	0,500
Alternativa 3	0	0		1	0,170
Total				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.42. Conclusión de criterios ponderados para módulo de transmisión de movimiento.

Conclusiones	Precisión	Velocidad	Costo	Vida Útil	Suma	Prioridad
Alternativa 1	0,167	0,025	0,050	0,050	0,292	3
Alternativa 2	0,167	0,050	0,100	0,080	0,392	1
Alternativa 3	0,067	0,075	0,150	0,025	0,317	2

(Fuente: Propia)

2.3.5. Diagrama morfológico

El diagrama morfológico es la agrupación de las alternativas con la mayor prioridad de solución de cada módulo, el cual se representa en la Tabla 2.43. indicada a continuación:

Tabla 2.43. Diagrama morfológico

Módulo	Alternativas		
Módulo1: Sujeción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Módulo 2: Control		Solución Única	
Módulo 3: Guía de movimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Módulo 4: Transmisión de movimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3

(Fuente: Propia)

Para el módulo 3, a pesar que la alternativa 1 fue la de mayor prioridad, también se utilizara la alternativa 3 conjuntamente con la 1 para dar más estabilidad a la máquina.

2.3.6. Prototipo seleccionado

El prototipo de la máquina se encuentra compuesto por las soluciones obtenidas por el método de criterios ponderados y el diagrama morfológico con las soluciones de mayor prioridad, siendo las siguientes soluciones las propuestas para cada módulo:

- La alternativa 1 para el módulo 1.
- La alternativa 1 y 3 para el módulo 3.
- La alternativa 2 para el módulo 4.



Figura 2.24. Prototipo seleccionado. a) Perspectiva isométrica, b) Vista frontal y c) Perspectiva isométrica trasera
(Fuente: Propia)

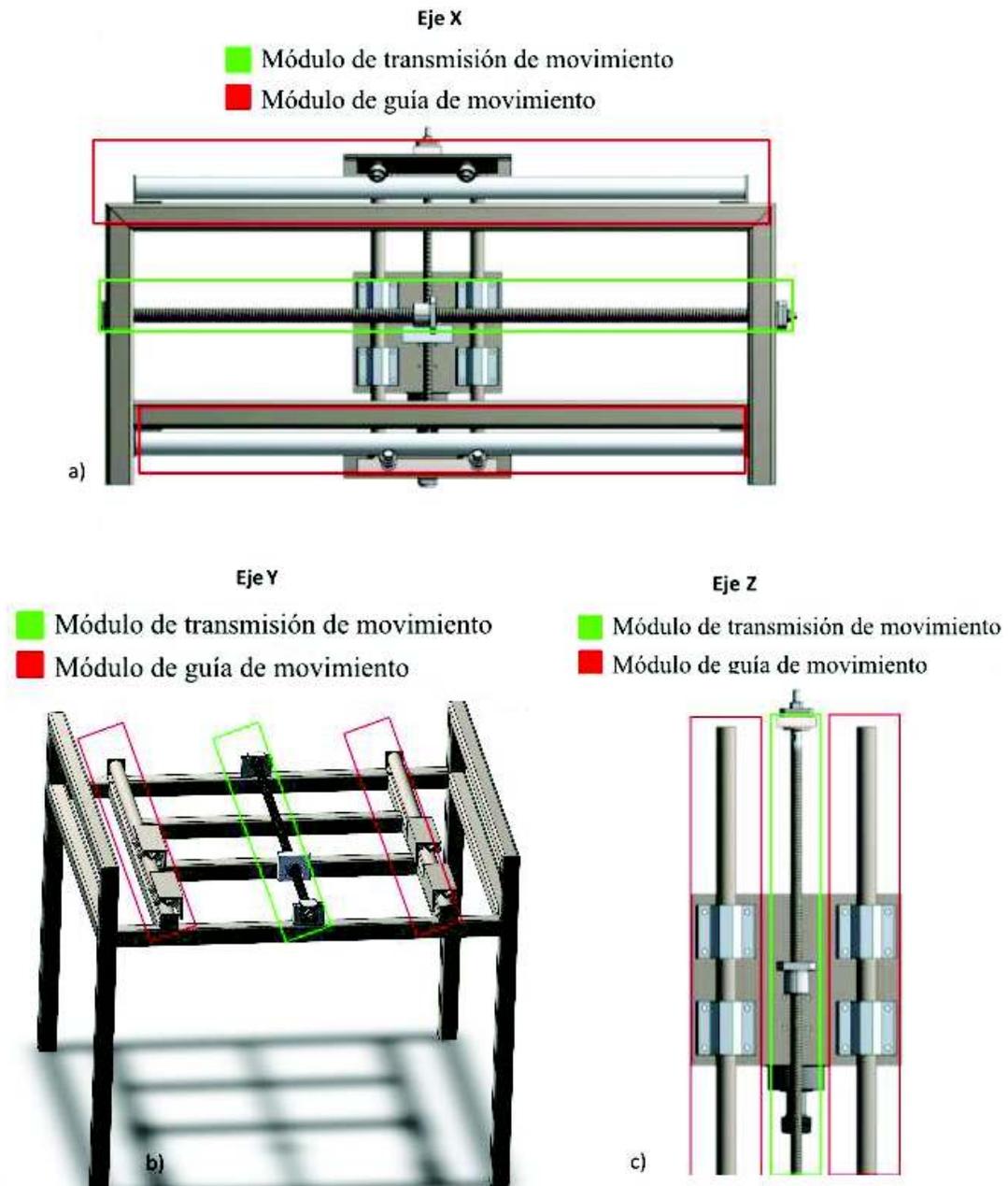


Figura 2.25. Identificación de módulos de guía y transmisión de movimiento en ejes X (a), Y (b) y Z(c) respectivamente
(Fuente: Propia)



Figura 2.26. CAD preliminar de la solución del módulo de guía de movimiento.
(Fuente: Propia)



Figura 2.27. CAD preliminar de la solución del módulo de transmisión de movimiento.
(Fuente: Propia)

2.4. Diseño mecánico

Una vez que se han obtenido las soluciones para cada módulo y se ha presentado una propuesta de solución, es necesario materializar el diseño con la especificación de formas y dimensiones de las diferentes piezas y componentes del sistema diseñado. El método empleado implica partir de un concepto general, y por medio de iteraciones al aplicar criterios técnicos y económicos, dimensionar y seleccionar las piezas y componentes óptimos para el funcionamiento de la máquina. [22]

2.4.1. Requerimientos limitadores

Son aquellos requerimientos o deseos de la especificación que dan lugar a limitaciones en el diseño de materialización, tales como [22]:

- Prestaciones exigidas (velocidades, fuerzas, tiempos, cadencias).
- Dimensiones exteriores, espacios disponibles, masas admisibles.
- Exigencias ergonómicas (fatiga, visión, seguridad, comprensión del control).
- Incidencias ambientales (evitar ruidos, contaminaciones y otros impactos).
- Tecnologías disponibles y capacidad de producción.
- Requerimientos de mantenimiento.
- Limitaciones de coste.

Los requerimientos limitadores (RL#) para la máquina diseñada son:

RL1) Dimensiones máximas desplazamiento de herramienta: $X=800$, $Y=600$, $Z=450$.

RL2) Dureza máxima de material a mecanizar: 131 Brinel, correspondiente a un acero AISI 1018.

RL3) Máxima velocidad de avance para todos los ejes: 10 m/min.

RL4) Vida útil: 25000 horas

RL5) Costo de fabricación: menor a \$25000 – Costo tentativo proyectado.

2.4.2. Funciones críticas

Un esbozo preliminar del diseño de materialización deja como evidencia la existencia de determinadas funciones que son críticas (FC#) en la resolución del problema, y sobre las cuales se debe establecer compromisos de diseño.

FC1) Avance de herramienta

FC2) Posicionamiento de herramienta

FC3) Desbaste longitudinal

FC4) Desbaste transversal

FC5) Sujeción y soporte de material a mecanizar

2.4.3. Parámetros críticos

Son parámetros críticos (PC#) aquellos que están relacionados con las funciones críticas, de tal manera que el cumplimiento de dichos parámetros permite ejecutar las funciones críticas satisfactoriamente. Dichos parámetros deben ser identificados para cada módulo.

2.4.3.1. Módulo 1

PC1) Operación de maquinado.

PC2) Potencia de la herramienta de corte.

PC3) Peso de la herramienta de sujeción.

PC4) Diámetro y número de pernos para sujeción de herramienta de corte.

2.4.3.2. Módulo 2

Este módulo se detallará en el Subcapítulo 2.6

2.4.3.3. Módulo 3

PC1) Fuerza de corte.

PC2) Sección transversal de las guías.

PC3) Dimensiones de rodamientos lineales

PC4) Dimensiones de rodamientos de bolas

PC5) Carga sobre la estructura de los soportes.

2.4.3.4. Módulo 4

PC1) Torque máximo y torque efectivo de servomotores

PC2) Dimensiones del tornillo de potencia

2.4.4. Condiciones críticas

Las funciones críticas conjuntamente con las condiciones críticas imponen una serie de condiciones tanto cuantitativas (CCt#) como cualitativas (CCI#), las cuales están delimitadas por los parámetros críticos.

CCt1) El tornillo de potencia debe funcionar sin fallar durante el ciclo de vida útil previsto.

CCt2) El tornillo de potencia deben presentar el paso necesario respectivamente para satisfacer demandas de precisión.

CCt3) Cada servomotor debe suministrar el torque necesario para proporcionar el avance a cada carro.

CCt4) Cada servomotor deberá tener la resolución adecuada para satisfacer demandas de precisión.

CCt4) Las guías no deben fallar por fatiga o sobrecarga durante la vida útil prevista.

CCt5) Las guías no deben fallar por deflexión durante la vida útil prevista.

CCt6) Los rodamientos no deben fallar durante la vida útil prevista.

CCt7) Los sujetadores roscados deben proporcionar la rigidez y resistencia necesaria para evitar el movimiento de pieza de trabajo.

CCt8) Las uniones soldadas deben garantizar la rigidez y estabilidad de las estructuras de soporte.

CCI1) Rodamientos deberán estar correctamente engrasados para proporcionar un movimiento con la menor cantidad de rozamiento posible.

CCI2) Los rodamientos deben desplazarse sobre las guías correspondientes.

2.4.5. Cálculo de condiciones críticas

2.4.5.1. Módulo 1

El módulo 1 corresponde al módulo de fijación de la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Como condición crítica se tiene la fijación de la herramienta, que depende de la selección del husillo de corte o spindle CNC, como se lo conoce comercialmente. Dicho husillo de corte debe satisfacer los requerimientos de corte.

2.4.5.1.1. Operación de mecanizado

Los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento en 3 ejes de una máquina CNC se diseñan en correspondencia a las operaciones admisibles de desbaste de material. Como operación de desbaste para el sistema diseñado, se considera la operación de fresado, debido a la variedad de geometrías de piezas que pueden obtenerse. Dentro del fresado se puede enunciar suboperaciones comunes como recantado, planeado, fresado de ranuras, y fresado de chaflanes. De dichas suboperaciones, se considera el planeado, ya que es la operación de fresado usada con mayor frecuencia según [45].

2.4.5.1.2. Potencia de mecanizado

Para seleccionar un husillo de corte se debe especificar el motor encargado de transmitir la potencia necesaria para el proceso de mecanizado. En dicha selección se considera el acero AISI 1018 como material de trabajo. Adicionalmente, se toma en cuenta que las condiciones de corte deben ajustarse para permanecer dentro de la potencia permisible del husillo seleccionado. Otro aspecto a considerar es la vida de la herramienta, la cual se ve reducida cuando la velocidad de avance o la velocidad de corte se incrementan [46]. El proceso de selección del motor del husillo consta de varios pasos que se detallan a continuación y en la Figura 2.28:



Figura 2.28. Proceso de selección de motor de husillo CNC.
(Fuente: [47])

1) Selección de la herramienta de corte y plaquita de corte.

1.1) Herramienta de corte.

Una vez definida la operación de mecanizado, el catálogo de Sandvik Coromant ofrece una gran cantidad de herramientas para dicho fin. De las opciones existentes se preselecciona la herramienta Coromil 415 (Figura 2.29), debido a que es un producto destacado en el catálogo de productos y debido a la variedad de diámetros de herramienta que permite utilizar. Los parámetros de trabajo recomendados de esta herramienta se tienen en la Tabla 2.44.



Figura 2.29. Herramienta de Planeado Coromil 415
(Fuente: [45])

Tabla 2.44. Parámetros de la Herramienta Coromil 415

Diámetro [mm]	N° dientes	a_p [mm]
13	5	0,85
20	4	0,85

(Fuente: [45])

1.2) Selección de la plaquita de corte

La preselección de la herramienta de corte implica la preselección de una plaquita de corte, la cual desbasta la viruta de la superficie del material mecanizado. Considerando el requerimiento de maquinar acero AISI 1018, y la compatibilidad con la herramienta Coromil 415, se selecciona la plaquita 415N-05 02 06M-M30 1040 del catálogo de Sanvik Coromant (Figura 2.30). Los parámetros de este tipo de plaquita se pueden observar en la Tabla 2.45.



Figura 2.30. Plaquita 415N-05 02 06M-M30 1040
(Fuente: [45])

Tabla 2.45. Parámetros de corte para plaquita 415-05 02 06M-30 1040

Plaquita 415-05 02 06M-M30 1040	
Velocidad de corte [m/min]	fz [mm]
145	0,48

(Fuente: [45])

2) Cálculo de la revoluciones de corte y velocidad de avance.

2.1) Revoluciones de corte

Para la selección del motor del husillo de corte, el primer paso es conocer las revoluciones a las cuales estaría girando el motor, siendo este un parámetro relacionado con la razón entre la velocidad de corte y el diámetro de la herramienta (Véase Ecuación (2.2) [47]). Los cálculos se realizaron para las diferentes opciones de diámetros que se tiene para la herramienta Coromil 415. A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo para una herramienta de 13[mm] de diámetro. El resumen de cálculos se tiene en la Tabla 2.49.

$$RPM = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} \quad (2.2)$$

Donde:

Vc: Velocidad de corte = 145 [m/min] [48].

D: Diámetro de la fresa = 13 [mm]

RPM: Revoluciones del motor [1/min]

Por sustitución en la ecuación (2.2), se obtiene el siguiente resultado

$$RPM = 3550,38 \text{ [1/min]}$$

2.2) Velocidad de Avance

El siguiente paso requiere calcular la velocidad de avance de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo según la Ecuación (2.3) [47]

$$f_m = (RPM * f_z * z) \quad (2.3)$$

Donde:

f_m= Velocidad de avance [mm/min]

f_z: Avance por diente = 0.48 [mm/diente] (Tabla 2.45)

Z: Número de dientes = 5 (Tabla 2.45)

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación (2.3), se obtiene.

$$f_m = 8520,91 \text{ [mm/min]}$$

3) Tasa de remoción de material

A continuación, se calcula la tasa de corte o remoción de material (R). El uso de las fórmulas de la Tabla 2.46 depende de la operación de maquinado. En el presente caso de estudio los cálculos se realizan para la operación de fresado.

Tabla 2.46. Fórmulas para calcular la tasa de remoción de material (R).

Operación	Tasa de remoción del metal, R	
	Unidades inglesas in^3/min	Unidades SI cm^3/s
Herramientas de un solo punto (Torneado, cepillado y limado)	$12Vfd$	$\frac{V}{60}fd$
Fresado	$f_m w d$	$\frac{f_m w d}{60,000}$
Rectificado	$12Vw n_c d_t$	$\frac{V}{60} w n_c d_t$

(Fuente: [47])

La nomenclatura para las variables en la Tabla 2.46 es la siguiente:

R= Tasa de corte o remoción de material [cm^3/s]

f_m = Velocidad de avance = 8520,91 [mm/min]

w=Espesor de corte =13 [mm] (Tabla 2.44)

d= Profundidad de corte = 0,85[mm] (Tabla 2.44)

De la ecuación presentada en la Tabla 2.46 para fresado en unidades internacionales se puede obtener que la tasa de remoción de material en este caso es:

$$R = 1.57 \text{ [} cm^3 / s \text{]}$$

4) Potencia de corte.

4.1) Potencia de la herramienta de corte

La potencia de la herramienta de corte se calcula de acuerdo a la Ecuación (2.4) [47], que incluye los factores: K_p que depende del tipo de material, C que es función del avance y W que es función del tipo de operación. Con excepción del parámetro K_p , el resto de factores se obtuvieron del ANEXO II y Tabla 2.47.

$$P_c = K_p * C * R * W \quad (2.4)$$

Donde

P_c = Potencia de la herramienta de corte [kW]

K_p = Constante de potencia = 1.2 [47].

C = Factor de avance = 0.91 (Véase ANEXO II)

W = Factor de desgaste de la herramienta =1.1 (Tabla 2.47)

Tabla 2.47. Factores de desgaste de la herramienta, W .

Tipo de operación		W
Toda operación con herramientas cortantes		1,00
Torneado	Acabado de torneado	1,10
	Torneado normal y semi-acabado	1,30
	Torneado en bruto (trabajo pesado)	1,60 - 2,00
Fresado	Fresado de bloque	1,10
	Acabado de fresado	1,10
	Fresado ligero y medio	1,10 - 1,25
	Fresado trabajo pesado	1,30 - 1,60
Taladrado	Taladrado normal	1,30
	Taladrar robusto	1,50
Rectificado	Rectificado normal	1,05 - 1,10
	Rectificado de superficies duras	1,20 - 1,30
Cepillado y limado	Usar valores dados para el torneado	-

(Fuente: [47])

Reemplazando los valores obtenidos en la Ecuación (2.4).

$$P_c = 1.89 \text{ [kW]}$$

5) Potencia del motor del husillo CNC.

Una vez obtenida la potencia de la herramienta de corte se procede a calcular la potencia del motor que accionará dicha herramienta según la Ecuación (2.5) y la Tabla 2.48 [47].

$$P_m = \frac{P_c}{E} \quad (2.5)$$

Donde:

P_m = Potencia del motor [kW]

E = Factor de eficiencia de la máquina herramienta=0.9 (Tabla 2.48).

Tabla 2.48. Factor de eficiencia de la máquina-herramienta

Tipo de conducción	E	Tipo de conducción	E
Correa directa	0,90	Engranaje orientado	0,70– 0,80
Engranaje posterior	0,75	Oleo hidráulico	0,60– 0,90

(Fuente: [47])

Reemplazando en la Ecuación (2.5).

$$P_m = 2,09 \text{ [kW]}$$

5.1) Resultados obtenidos para diferentes diámetros.

Tabla 2.49. Potencia de corte y Potencia del motor respectivamente para diferentes diámetros

Diámetro[mm]	Pc [kW]	Pm [kW]
13	1,89	2,09
20	1,51	1,68
25	2,13	2,37
32	2,13	2,37

(Fuente: Propia)

Según los datos obtenidos de potencia y velocidad de giro, se selecciona un husillo motor para mecanizado CNC que cumple con las demandas de potencia (Figura 2.31). Las especificaciones técnicas se incluyen en la Tabla 2.50.



Figura 2.31. Husillo CNC ER20, enfriado por aire.

(Fuente: [49])

Tabla 2.50. Características técnicas de husillo CNC ER20 de 3kW.

Husillo CNC ER20 de 3kW	
Potencia	3 [kW]
Voltaje	220 [V]
Frecuencia	300 [Hz]
Velocidad de giro	0-18000 [rpm]
Enfriamiento	Por aire
Lubricación	Grasas lubricantes

(Fuente: [49])

2.4.5.1.3. Tornillos para sujetar el husillo:

Para la sujeción del husillo se supone que los tornillos necesarios únicamente soportan el peso del husillo. Se proyecta colocar 6 tornillos de sujeción. El peso del husillo (masa: [10 kg]) se distribuye equitativamente entre los 6 tornillos.

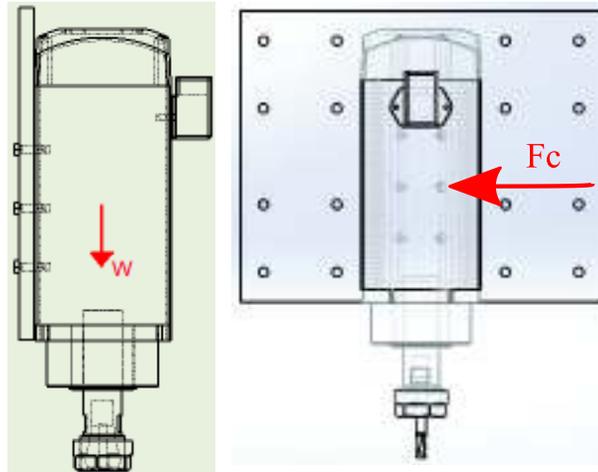


Figura 2.32. Tornillos que sujetan al husillo a la placa base
(Fuente: Propia)

Al realizar la sumatoria de fuerzas para cada eje se tiene que las resultantes que tienen que soportar cada perno son:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_x = F_c = 780[N]$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow R_z = mg = 98[N]$$

Por lo cual la fuerza de cortante resultante es:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_z^2} = 131,02[N]$$

Los 6 tornillos se encuentran sometidos únicamente a fuerzas cortantes y la carga se distribuye uniformemente a todos los tornillos. Por lo cual se utiliza la Ecuación (2.6.).

$$\tau = \frac{F}{NA_p} \leq S_p \rightarrow A_{pmin} = \frac{F}{NS_p} \quad (2.6.)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante

F: Fuerza de corte aplicada = R = 131,02[N]

N: Número de tornillos = 6

A_p : Área de los pernos

S_p : Resistencia mínima a fluencia de los pernos = 400 [N/mm²]

Al sustituir en la ecuación (2.6.) se tiene:

$$A_{p_{\min}} = 0,055[\text{mm}^2] \rightarrow d_{\min} = 0,264[\text{mm}]$$

Los resultados de cálculo se presentan en la Tabla 2.51.

Tabla 2.51

Tabla 2.51. Resultados tornillos de sujeción del husillo

Eje	Fuerza [N]	Sut. [N/mm ²]	A. mín [mm ²]	d. mín [mm]	d. seleccionado [mm]	Esfuerzo [Mpa]	Factor de seguridad
Sujeción husillo	21,84	400,00	0,055	0,264	5	6,67	59,94

(Fuente: Propia)

2.4.5.1.4. Estructura de soporte.

Como parte del módulo 1 se lleva a cabo un estudio de la estructura de soporte, en función del diseño del cordón de soldadura requerido para el armado de la estructura y los esfuerzos que a los que está sometido.

2.4.5.1.4.1. Uniones soldadas en la estructura

En el análisis de la soldadura de la estructura se identificó dos tipos de uniones comunes sometidas a cargas de flexión:

- Soldadura a tope
- Soldadura de filete

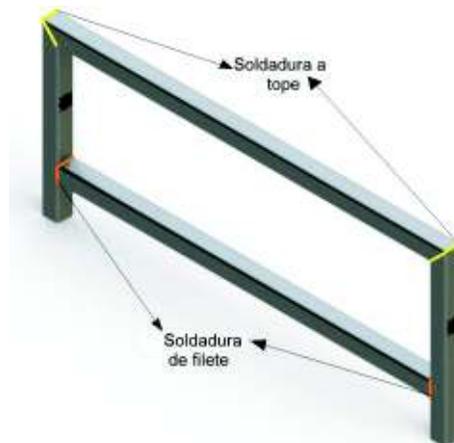


Figura 2.33. Uniones soldadas de la estructura del eje X
(Fuente: Propia)

Se proyecta realizar las soldaduras de la estructura con electrodo E70XX (Proceso SMAW).

Las propiedades del electrodo se detallan a continuación:

- Resistencia a la tensión: 482 [MPa]
- Resistencia a la fluencia: 393 [MPa]
- Elongación porcentual: 22%

Las dimensiones del cordón de soldadura se definen en las tablas de AWS D1.1

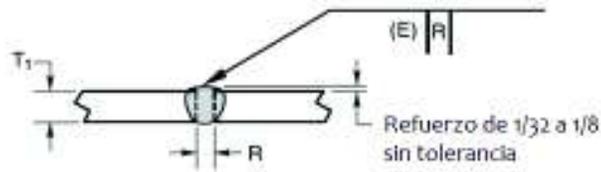


Figura 2.34. Soldadura de unión a tope AWS D1.1
(Fuente: [50])

Tabla 2.52 Uniones soldadas – Configuración de junta a tope.

Parámetros de soldadura		Valores en la norma AWS D1.1
Designación de la junta		AWS D1.1: B-P1a
Tipo de Junta		A tope
Tipo de Ranura		Ninguno (sin bisel)
Espesor material base	T1 [mm]	3
Separación de la junta	R [mm]	0 – 1,6
Tamaño de soldadura	E[mm]	2,4
Refuerzo	[mm]	0,8 - 3

(Fuente: Propia)

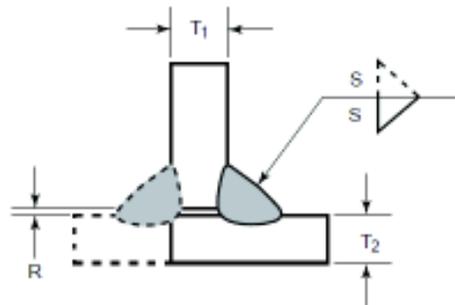


Figura 2.35. Soldadura de Filete de junta tipo T AWS D1.1
(Fuente: [50])

Tabla 2.53. Uniones soldadas – Configuración soldadura de filete.

Parámetros de soldadura		Valores en la norma AWS D1.1
Designación de la junta		AWS D1.1: TC-F12
Tipo de Junta		De Filete
Tipo de Ranura		Ninguno (sin bisel)
Espesor material base	T1 o T2 [mm]	3
Separación de raíz	R [mm]	0
Tamaño de soldadura	S[mm]	2,4

(Fuente: Propia)

2.4.5.2. Módulo 3

EL módulo 3 es el módulo de guía de movimiento, el mismo debe garantizar un movimiento rectilíneo a lo largo del recorrido, además de soportar las cargas que se presentan al momento de trabajo. Las guías deben presentar un correcto funcionamiento a lo largo de toda la vida útil de la máquina; sin fallar por fatiga, sobre cargas y/o deflexiones que afecten negativamente su funcionamiento.

En la Figura 2.36 se detalla la ruta de cálculo de la sección transversal de las guías.



Figura 2.36. Procedimiento de Cálculo de la sección transversal de las Guías (Fuente: Propia)

2.4.5.2.1. Fuerza de corte

Utilizando la fórmula general de potencia, Ecuación (2.7), se despeja el valor de la fuerza corte, a partir del conocimiento de la potencia y la velocidad de avance de la herramienta de corte.

$$P_c = F_c * V_c \quad (2.7)$$

Donde:

P_c: Potencia de corte= 3 [kW] (Tabla 2.50)

V_c=Velocidad de avance= 145 [m/min] (Tabla 2.45)

Por substitución de los valores correspondientes en la ecuación (2.7), se obtiene:

$$F_c = 780 [N]$$

A continuación en la Tabla 2.54 se tabulan las fuerzas generadas según diferentes diámetros de la herramienta de corte. Para los cálculos posteriores se utilizará la fuerza de mayor valor.

Tabla 2.54. Fuerza de corte para diferentes diámetros de herramienta Coromil 415.

Diámetro[mm]	F _c [N]
13	780
20	624

(Fuente: Propia)

2.4.5.2.2. Fuerza que soportan las guías verticales y horizontales

Para realizar el cálculo de fuerzas que soportan las guías, se asume que la fuerza de corte se produce en la punta de la herramienta, y debido a la acción de dicha fuerza, se producen únicamente reacciones en dos direcciones dependiendo del eje de movimiento debido al tipo de apoyo (Rodamiento lineal) no permite transmitir momentos. Para un mejor entendimiento se desglosará cada eje con un esquema de las fuerzas que actúan sobre el mismo a continuación.

Consideraciones:

- El modelo de cálculo solo considera las fuerzas que actúan directamente sobre las guías. Las fuerzas restantes así como el análisis de la transmisión de movimiento se lo realiza en el Subcapítulo 2.4.5.3. En la Figura 2.37 no se toma en cuenta el peso debido a que éste no ejerce ninguna acción sobre las guías, este es tomado en cuenta en el análisis de transmisión de movimiento.
- Se empleará la fuerza de corte F_c=780[N] correspondiente a un diámetro de la herramienta de 13 mm.

- El mayor diámetro de herramienta utilizada será de 20 mm. Los diámetros superiores a 20 mm se desprecian por motivos de costo.
- Se considera que la fuerza de corte es puntual y en una sola dirección, actuando en la punta de la herramienta de corte (Operación de mecanizado en dirección horizontal en sentido de derecha a izquierda).

2.4.5.2.2.1. Para el Eje Z

En la Figura 2.37 y Figura 2.38 se puede observar las fuerzas que actúan sobre el carro del eje Z. Cabe mencionar que para este análisis de fuerzas no se toma en cuenta la carga del peso de la herramienta ya que dicha carga es soportada por el tornillo sin fin y no por las guías.

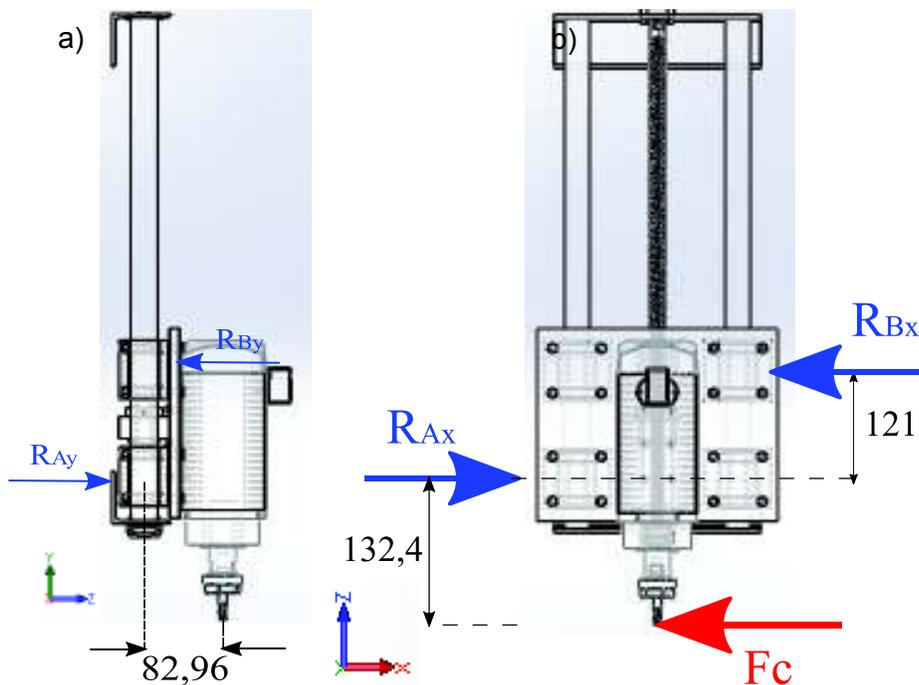


Figura 2.37. Esquema del carro porta herramienta. a) Fuerzas actuantes en plano YZ b) Fuerzas actuantes en plano ZX
(Fuente: Propia)

Por lo cual se tiene que

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_{Ax} = R_{Bx} + F_c \quad (2.8.)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow R_{Ay} = R_{By} \quad (2.9.)$$

$$\sum M_{A-Y} = 0 \rightarrow R_{Bx} = \frac{F_c \times 132,4}{121} \quad (2.10.)$$

$$\sum M_{A-Z} = 0 \rightarrow R_{By} = \frac{F_c \times 82,96}{178} \quad (2.11.)$$

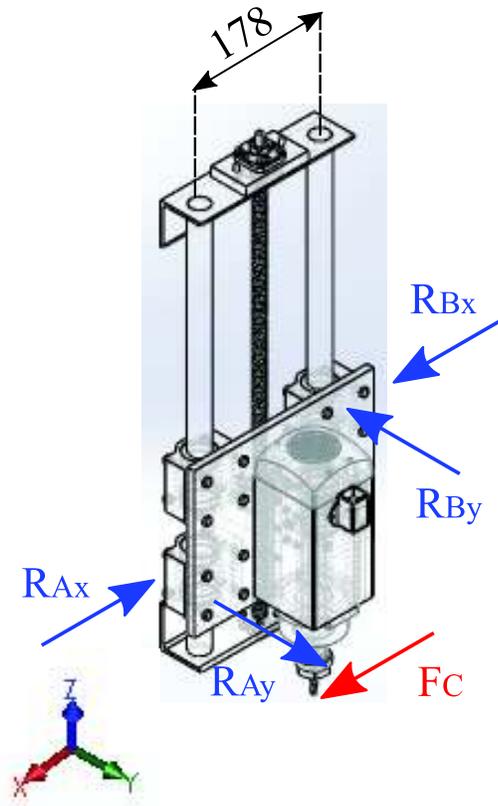


Figura 2.38. Esquema de fuerzas 3D de fuerzas actuantes en carro Z.
(Fuente: Propia)

Al substituir los valores correspondientes en las ecuaciones (2.8.), (2.9.), (2.10.) y (2.11.) se obtiene los siguientes resultados presentaos en la Tabla 2.55:

Tabla 2.55. Reacciones resultantes para el eje Z.

Reacción	Valor [N]
RA_x	1633,49
RA_y	363,53
RA	1673,45
RB_x	853,49
RB_y	363,53
RB	927,68

(Fuente: Propia)

En los cálculos siguientes se toma la reacción R_A como la fuerza que actúa sobre las guías, debido a que ésta es mayor a R_B . Las reacciones actuan sobre los ejes guías debido a la tercera ley de Newton de acción y reacción.

2.4.5.2.2.2. Para el Eje X

Las fuerzas que actúan sobre el eje X se pueden apreciar en la Figura 2.39 y Figura 2.40. En este caso la fuerza de corte es soportada por el tornillo sin fin, mientras que el peso de la estructura se apoya en las guías; adicionalmente la fuerza de corte genera una carga adicional en las guías.

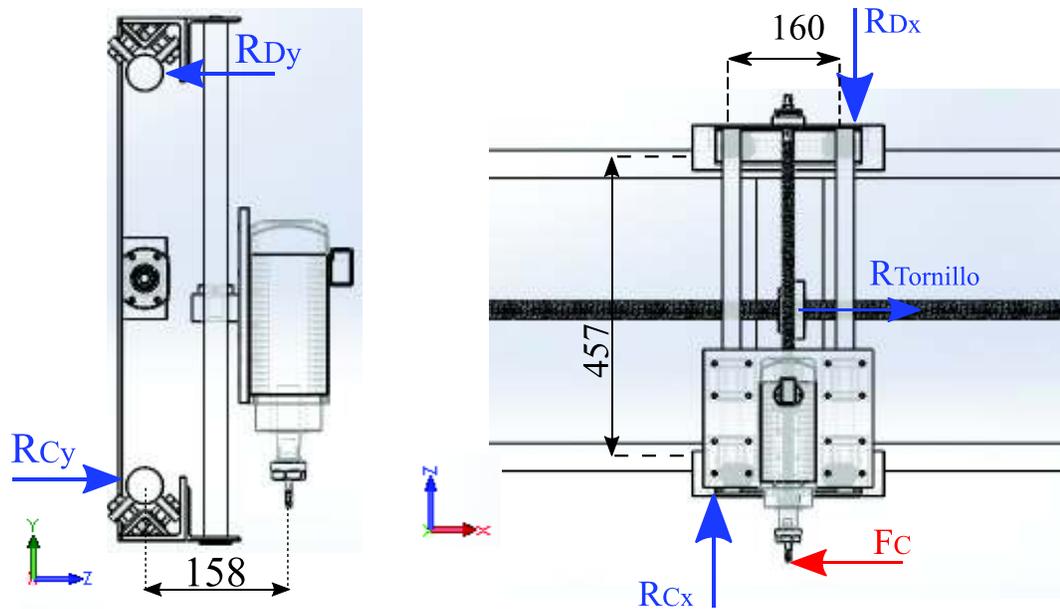


Figura 2.39. Esquema de fuerzas que actúan en carro X. a) Fuerzas actuantes en plano YZ. b) Fuerzas actuantes en plano ZX.
(Fuente: Propia)

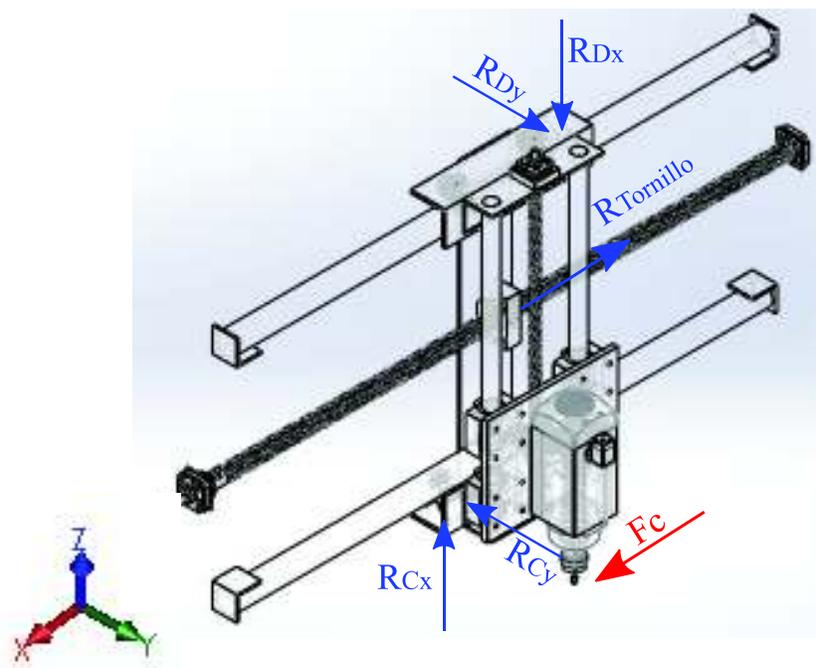


Figura 2.40. Esquema 3D de fuerzas que actúan sobre carro X
(Fuente: Propia)

De las figuras anteriores se tiene:

$$\sum F_X = 0 \rightarrow R_{Tornillo} = F_C \quad (2.12.)$$

$$\sum F_Y = 0 \rightarrow R_{C_Y} = R_{D_Y} \quad (2.13.)$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow RCZ + RDZ = mg \quad (2.14.)$$

$$\sum M_{C-Y} = 0 \rightarrow RD_Z = \frac{F_C \times 120 + mg \times 80 + R_{Tornillo} \times 228,5}{457} \quad (2.15.)$$

$$\sum M_{C-Z} = 0 \rightarrow RDY = \frac{FC \times 158}{160} \quad (2.16.)$$

Al reemplazar los datos ($F_C=780[N]$, $m=34.57[kg]$) en las ecuaciones (2.12.), (2.13.), (2.14.) , (2.15.) y (2.16.) se obtiene los resultados representados en la Tabla 2.56:

Tabla 2.56. Reacciones resultantes para el eje X.

Reacción	Valor [N]
RC_Y	770,25
RC_Z	-450,85
RC	892,50
RD_Y	770,25
RD_Z	789,63
RD	1103,09
$R_{Tornillo}$	1051,03

(Fuente: Propia)

Para el caso del eje X en los siguientes cálculos se utilizara el valor RD, debido a que este es mayor al valor RC, como la fuerza que actúa sobre las guías del eje X.

2.4.5.2.2.3. Para el Eje Y

En la Figura 2.41 se puede apreciar las fuerzas que actúan sobre el carro del eje Y, en el caso del eje Y las guías deben soportar tanto el peso de la mesa de trabajo como la fuerza de corte que se genera.

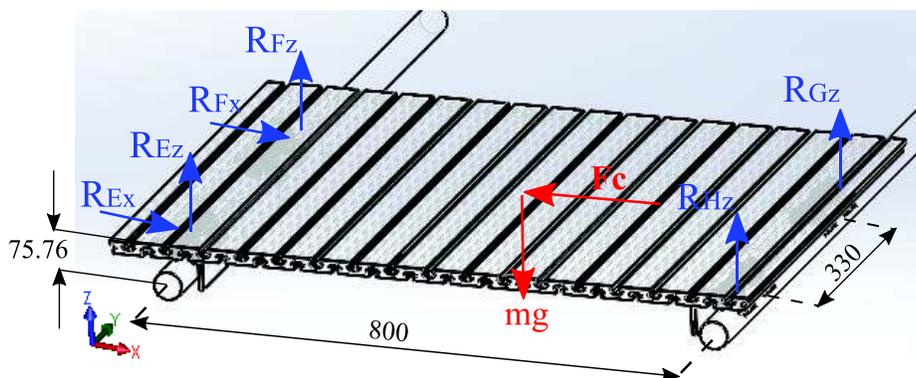


Figura 2.41. Esquema 3D de fuerzas que actúan en carro Y.

(Fuente: Propia)

Para este caso se asumirá las ecuaciones (2.17.) y (2.18.) debido a que la fuerza de corte y el centro de masas se encuentra en una disposición simétrica con respecto a los puntos de apoyo.

$$RE_z = RF_z \quad (2.17.)$$

$$RG_z = RH_z \quad (2.18.)$$

Al realizar las ecuaciones de fuerza y momento se obtiene:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow RE_x + RF_x = F_c \quad (2.19.)$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow RE_z + RF_z + RG_z + RH_z = mg \quad (2.20.)$$

$$\sum M_{1-z} = 0 \rightarrow RF_x = \frac{F_c \times 165}{330} \quad (2.21.)$$

Al reemplazar los valores ($F_c=780$ [N] y $m=26,83$ [kg]) se obtiene los resultados representados en la :

Tabla 2.57. Reacciones resultantes para el eje Y.

Reacción	Valor [N]
RE_x	390,00
RE_z	102,67
RE	403,29
RF_x	390,00
RF_z	102,67
RF	403,29
RG_z	28,80
RH_z	28,80

(Fuente:Propia)

Para el caso de las guías del eje Y se tomara en cuenta tanto la reacción RE como la reacción RF, debido a que las dos actúan sobre la misma guía.

Cabe mencionar que los siguientes cálculos toma en cuenta la fuerza máxima aplicada. Dicha fuerza, a pesar de ser puntual, solo actúa mientras la máquina realiza el corte.

2.4.5.2.3. Sección transversal de las guías verticales

Para la selección del diámetro de los ejes guías se toma en cuenta las siguientes consideraciones.

- Material: Acero AISI 1018, módulo de elasticidad $E=200$ [GPa] (ANEXO III) y Resistencia ultima a tensión $S_{ut} = 400$ [MPa] (ANEXO IV)

- Las guías trabajan a fatiga, la fuerza que actúa sobre cada eje guía es puntual.
- No existen cargas constantes. La carga es fluctuante (con respecto a la posición donde se aplica) y se produce durante el mecanizado.
- Los cálculos se los realiza para los diámetros de ejes que se encuentran normalmente en el mercado (diámetros normalizados).

Por lo anteriormente expuesto, el diseño de las guías se realiza a fatiga, para lo cual se consideran los siguientes puntos:

1) Determinación del límite de Resistencia a la fatiga

El límite de resistencia a la fatiga se puede calcular con la Ecuación (2.22) [44]:

$$S_e' = 0,5 \times S_{ut} \quad (2.22)$$

Donde:

S_e' = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

$$S_e' = 0,5 \times 400 \text{ [MPa]}$$

$$S_e' = 200 \text{ [MPa]}$$

Además, es necesario tomar en cuenta varios factores que afectan el límite de resistencia a la fatiga. La corrección por factores se realiza en base a la Ecuación (2.23) [44]:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (2.23)$$

Donde:

k_a = Factor de modificación por la condición superficial

k_b = Factor de modificación por el tamaño

k_c = Factor de modificación por la carga

k_d = Factor de modificación por la temperatura

k_e = Factor de confiabilidad

k_f = Factor de modificación por efectos varios

S_e = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

El factor k_a se lo puede calcular con la Ecuación (2.24) [44].

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (2.24)$$

Donde: a y b son factores que se encuentran en la tabla del ANEXO V.

Estos factores dependen del acabado superficial del material. En el caso de las guías se trata de acero laminado en caliente.

Donde

a=57,7 y b=-0,718.

Al sustituir estos valores en la ecuación (2.24) se tiene:

$$k_a = 57,7 \times 400^{-0.718}$$

$$k_a = 0,781$$

Para el cálculo del factor k_b se debe tomar en cuenta el diámetro del eje, el cual todavía es desconocido. Debido a las cargas que se presentan se asume que el diámetro se encontrará en un rango de $2,79 \leq d \leq 51$ mm, como parte de una primera iteración de diseño. En consecuencia se utiliza la Ecuación (2.25) [44]:

$$k_b = 1,24d_e^{-0,107} \quad (2.25)$$

Siendo d_e una corrección del diámetro nominal debido a que el eje no se encuentra rotando y viene dado por la Ecuación (2.26)[44], esta ecuación se la puede utilizar para cualquier rango de diámetros:

$$d_e = 0,37d \quad (2.26)$$

Los resultados de k_b varían de acuerdo al diámetro por lo cual su resultado se presenta en la Tabla 2.58.

El factor k_c está es dado por el tipo de carga que se aplica, y en este caso es uno por que el eje solo soporta cargas de flexión.

$$k_c = 1$$

El factor k_d se ve influenciado por la temperatura de trabajo y se obtiene de la tabla en el ANEXO VI, tomando en cuenta que el factor viene dado por la Ecuación (2.27)[44]:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (2.27)$$

Donde

S_T =Resistencia a la tensión a la temperatura de operación

S_{RT} = resistencia a la tensión a temperatura ambiente

Para el caso de estudio la temperatura de trabajo asumida es de 20° C por lo que el factor resultante es:

$$k_d = 1$$

Para el factor de confiabilidad k_e se obtiene de la tabla en el 0, dependiendo del factor de confiabilidad.

En este estudio, la confiabilidad asumida es del 99,9% por lo cual el factor k_e es:

$$k_e = 0,753$$

El factor de modificación por efectos varios es uno, ya que el equipo no trabajará en condiciones ambientales extremas.

$$k_f = 1$$

Para diferentes diámetros, el límite de resistencia a la fatiga se tabula en la Tabla 2.58

Tabla 2.58. Límite de resistencia a la fatiga para los diferentes diámetros de eje.

Diámetro d [mm]	Factor						Limite a fatiga Se [Mpa]
	ka	kb	kc	kd	ke	kf	
16	0,781	1,025	1	1	0,753	1	120,640
20	0,781	1,001	1	1	0,753	1	117,800
25	0,781	0,977	1	1	0,753	1	115,020
30	0,781	0,958	1	1	0,753	1	112,800
35	0,781	0,943	1	1	0,753	1	110,950

(Fuente: Propia)

2) Esfuerzo en el eje guía

Consideraciones:

En esta sección se muestra el ejemplo de cálculo tomando como referencia el eje Z, los resultados de todos los ejes se detallan en el subcapítulo 2.5.2.1.

El momento flector máximo cambia de acuerdo a la posición de la herramienta en el eje Z durante el maquinado. Para el cálculo del esfuerzo se toma el máximo momento flector.

- Cálculo del momento flector máximo

En referencia a la Figura 2.42, para el cálculo del momento flector máximo en los extremos de la guía se utiliza la Ecuación (2.28) [51] si $a < b$ o la Ecuación (2.29) [51] si $a > b$:

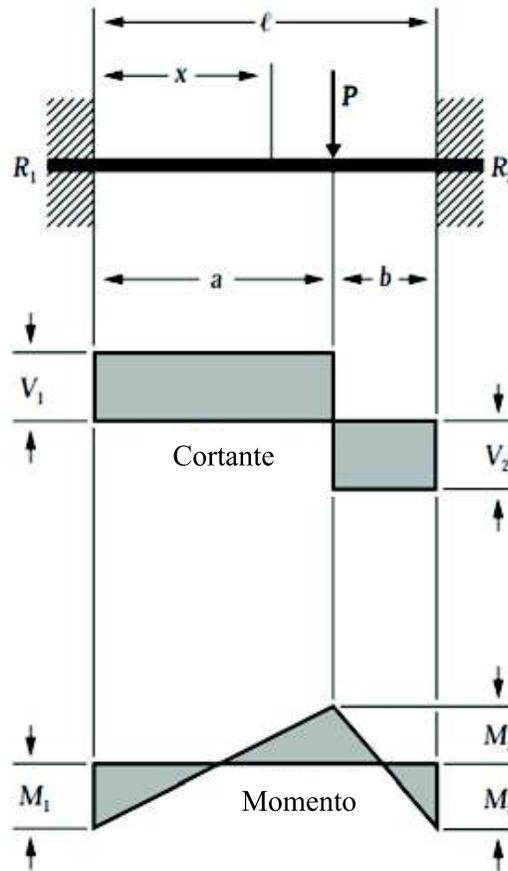


Figura 2.42. Diagramas de Fuerza cortante y Momento flector.
(Fuente: [51])

$$M_1 = \frac{Pab^2}{l^2} \quad (2.28)$$

$$M_2 = \frac{Pa^2b}{l^2} \quad (2.29)$$

Se calcula también el momento máximo en el punto de carga M_a con la ecuación (2.30) [51]

$$M_a = \frac{2Pa^2b^2}{l^3} \quad (2.30)$$

Una vez realizado este cálculo se debe tomar el momento máximo entre M_1 o M_2 y M_a para realizar los siguientes cálculos.

A continuación se presentan los resultados para el eje de 25 [mm] de diámetro. Se parte de los siguientes datos:

$$P=RA= 1673,45 \text{ [N]}$$

$$a= 194,5 \text{ [mm]}$$

$$b=375,5 \text{ [mm]}$$

$$l=570 \text{ [mm]}$$

$$d=25 \text{ [mm]}$$

$$M_1 = 141,31 \text{ [N.m]}$$

$$M_2 = 73,17 \text{ [N.m]}$$

$$M_a = 94,21 \text{ [N.m]}$$

En este caso el momento máximo es M_1 .

En la Tabla 2.59 se muestran las reacciones y momentos en los extremos de los ejes guías.

Tabla 2.59. Reacciones en los extremos de los ejes Guías.

Reacciones	R1 [N]	R2 [N]	M1 [Nm]	M2 [Nm]
Eje X	798,00	305,00	177,90	94,20
Eje Y	543,00	263,70	111,20	73,60
EjeZ	1239,60	433,90	141,31	73,17

(Fuente: Propia)

- Cálculo de esfuerzo

Con el momento flector máximo se calcula el esfuerzo con la Ecuación (2.31) [44], se continuara utilizando el diámetro de 25 [mm] para realizar un ejemplo de cálculo de las iteraciones realizadas:

$$\sigma_a = \left[\left(\frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right) + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_a}{\pi d^3} \right) \right] \quad (2.31)$$

En este caso el esfuerzo de torsión (correspondiente a la segunda parte de la ecuación) es cero debido a que el elemento trabaja únicamente a flexión y $K_f = 1$ debido a que el eje no posee concentradores de esfuerzo. Se obtiene el siguiente resultado:

$$\sigma_a = 92,12 \text{ [MPa]}$$

3) Cálculo del factor de seguridad

El esfuerzo total que actúa sobre las guías es una combinación de los esfuerzos generados por las fuerzas fluctuantes y fuerzas permanentes que actúan sobre las mismas. Por lo tanto el factor de seguridad, n , para ejes a fatiga se lo obtiene con la Ecuación (2.32) [44] correspondiente al criterio de Goodman modificado.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad (2.32)$$

Debido al funcionamiento de una máquina CNC, el esfuerzo es alternante y no existe esfuerzo medio. Por substitución en la ecuación (2.32), se obtiene:

$$n = 1,25$$

Lo cual es aceptable de acuerdo con el código A.S.M.E para el diseño de ejes, el cual establece que el factor de seguridad base es $n=1,25$ [52] (Ver ANEXO VIII). Es decir el eje de 25 [mm] se puede utilizar para este caso.

4) Cálculo de la deflexión máxima.

En el caso de máquinas CNC es necesario mantener la precisión de movimiento, por lo que la deflexión en las guías juega un papel muy importante. Si existe una deflexión muy grande se produce un error en el posicionamiento. Por lo anteriormente expuesto, la deflexión se calcula con la Ecuación (2.33) [51].

$$\Delta_{\max} = \frac{2Pa^3b^2}{3EI(3a+b)^2} \quad (2.33)$$

Donde:

P: Carga en la guía =RA

E: Módulo de elasticidad (acero AISI 1018 E=200 [GPa])

I=Inercia

a y b : distancias de la fuerza a los extremos del eje (Para el cálculo de la deflexión se tomara que $a=b=285$ [mm]).

Se obtiene el siguiente resultado al reemplazar los valores en la ecuación (2.33):

$$\Delta_{\max} = 0,421 \text{ [mm]}$$

La deflexión máxima en ejes de transmisión según Muhhamad M. Raza de la Universidad Estatal Politécnica de California, son aceptables si no sobrepasa 0,43 [mm]; por lo cual este diámetro cumpliría con las prestaciones requeridas (Ver ANEXO IX) [53].

Los resultados de las iteraciones realizadas para el cálculo de esfuerzo máximo, factor de seguridad y deflexión máxima se los presenta en la Tabla 2.60.

Tabla 2.60. Resultados de cálculo de diámetro del eje guía Z.

Diámetro d [mm]	Limite a fatiga Se [Mpa]	Esfuerzo máximo [Mpa]	F. seguridad n	Deflexión máxima [mm]
16	120,644	351,418	0,343	2,509
20	117,797	179,926	0,655	1,028
25	115,018	92,122	1,250	0,421
30	112,796	53,311	2,116	0,203
35	110,951	33,572	3,305	0,110

(Fuente: Propia)

2.4.5.2.4. Fuerzas que actúan sobre rodamientos usados para guiar el movimiento en eje X e Y

Para el cálculo de fuerzas sobre los rodamientos que componen el sistema de guías en los ejes X e Y se considera las fuerzas de reacción máximas aplicadas de manera puntual. Para ejemplo de cálculo se tomará al eje X de desplazamiento, debido a que este está sometido a las cargas de mayor magnitud, obtenidas de la Tabla 2.56. En la Figura 2.43. se tiene un esquema de dichas fuerzas que actúan sobre los pernos. Para mayor detalle de las fuerzas que actúan en el ejemplo de cálculo se puede volver a revisar la Figura 2.39 y Figura 2.40.

Consideraciones:

- El cálculo se realiza para una operación de mecanizado en dirección horizontal en sentido de derecha a izquierda.
- Las fuerzas están aplicadas de manera vertical en el extremo de las placas que sirven de soporte para los rodamientos.

La configuración usada para la guía de movimiento se detalla en la Figura 2.44. Donde los rodamientos deslizarán sobre un eje liso. La fuerza en la dirección Y se obtiene por sumatoria de fuerzas (Ecuación (2.34.)); considerando que la fuerza de reacción aplicada de forma puntual sobre el sistema de guía se distribuye a 2 de los 4 rodamientos usados Véase Figura 2.44. Esto debido a la suposición de separación de los dos rodamientos que

se encuentran alejados de la carga. Y la resultante sobre el rodamiento se obtiene de acuerdo a la Ecuación(2.35.).

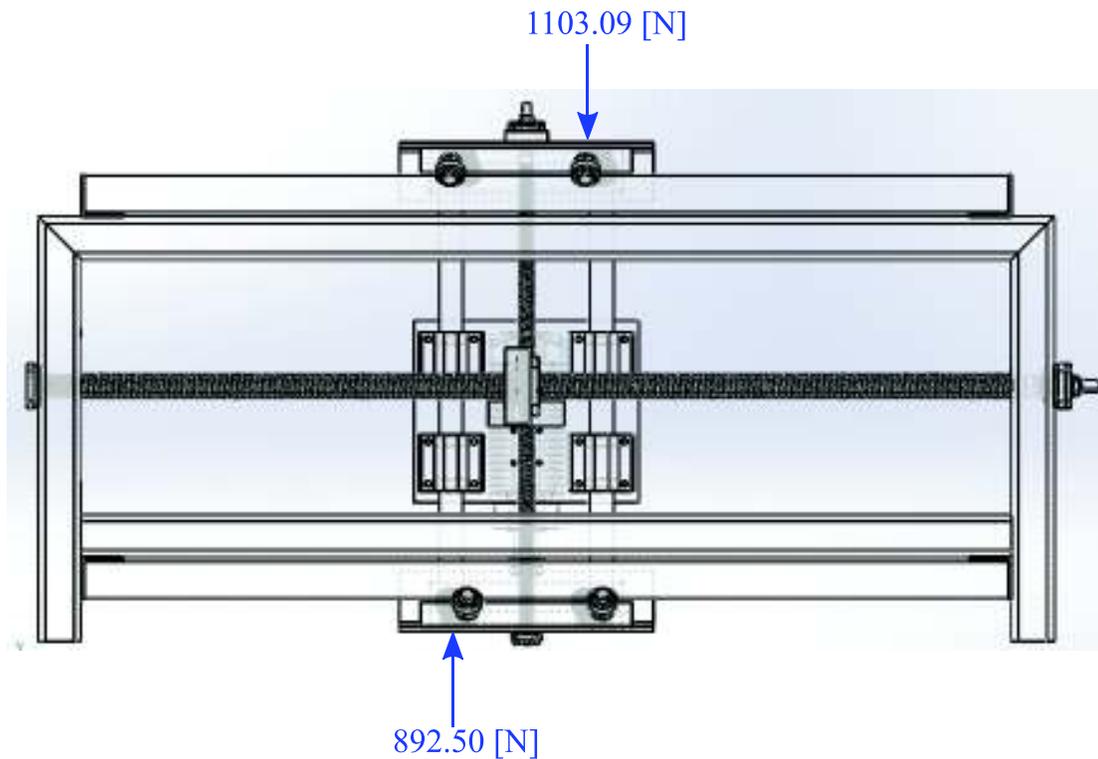


Figura 2.43. Esquema de fuerzas que actúan sobre conjunto de pernos y rodamientos de guía de movimiento en el eje X.
(Fuente: Propia)

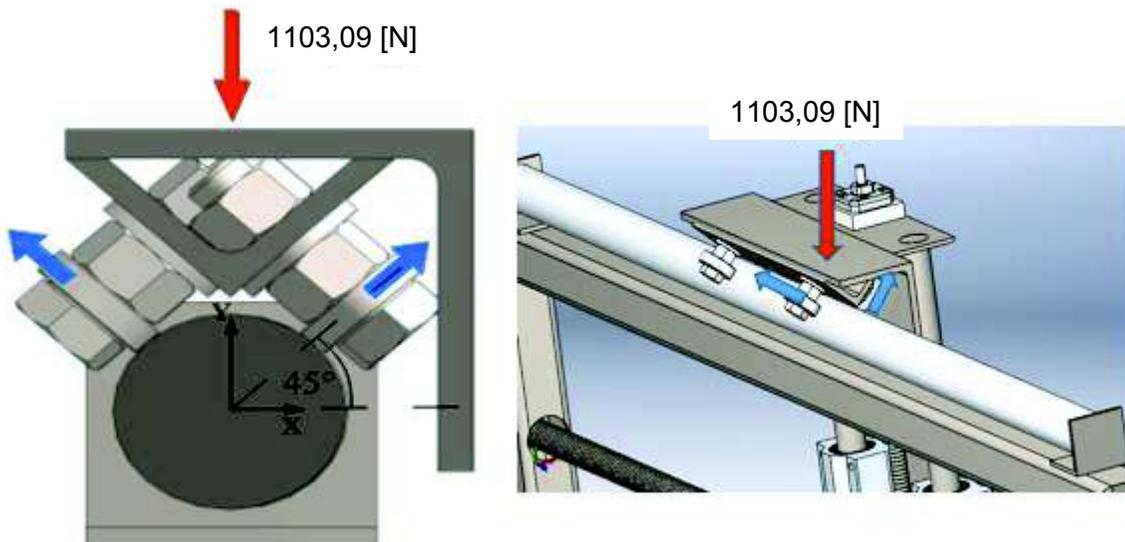


Figura 2.44. Esquema de fuerzas que actúan sobre sistema de rodamientos para guía de movimiento en eje X e Y.
(Fuente: Propia).

Para realizar el correspondiente análisis de fuerzas se presenta un diagrama de cuerpo libre en la Figura 2.45.

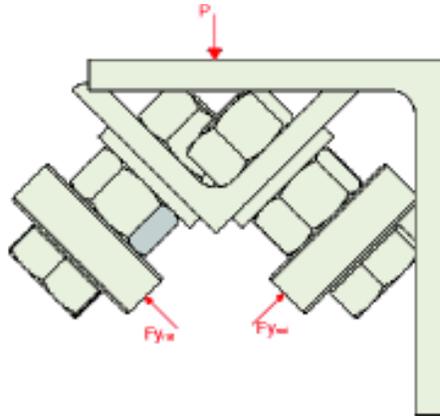


Figura 2.45. Diagrama de cuerpo libre para rodamientos usados en guía de movimiento.
(Fuente: Propia).

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{y_{rodamiento}} + F_{y_{rodamiento}} - 1103.09 = 0 \quad (2.34.)$$

$$F_{y_{rodamiento}} = 551,54 \text{ [N]}$$

$$F_{rodamiento} = \frac{F_{y_{rodamiento}}}{\cos(45^\circ)} \quad (2.35.)$$

La fuerza resultante en cada rodamiento activo resulta:

$$F_{rodamiento} = 780,11 \text{ [N]}$$

2.4.5.2.5. Carga dinámica que actúa sobre los rodamientos.

Las cargas que actúan sobre el módulo de guía de movimiento varían entre 1103,09 [N] y 892,50 [N], en condición de trabajo y condición libre respectivamente. Para las condiciones de carga denotadas anteriormente, se tiene $F_{m\acute{a}x} = 780,11 \text{ [N]}$ y $F_{m\acute{i}n} = 631,09 \text{ [N]}$. De acuerdo al catálogo de SKF para rodamientos de bolas r\ígid \acute{a} s [54], la fuerza equivalente que actúa sobre el rodamiento est\`a dada por la Ecuaci3n (2.25):

$$F_m = \frac{F_{m\acute{i}n} + 2F_{m\acute{a}x}}{3} \quad (2.36.)$$

Donde:

F_m : Carga din\`amica equivalente

$F_{m\acute{a}x}$: Fuerza m\`axima que se aplica en rodamiento (durante mecanizado) = 780,11 [N]

$F_{m\acute{i}n}$: Fuerza m\`inima aplicada en rodamiento (debido a peso de estructura) = 631,09 [N].

Por sustituci3n en la ecuaci3n (2.36.) se obtiene:

$$F_m = 730,37 [N]$$

2.4.5.3. Módulo 4

2.4.5.3.1. Selección de husillo de bolas según THK

En este apartado se optó por la marca THK para la adquisición del husillo de bolas, debido al prestigio de esta compañía en la fabricación de estos componentes. El proceso de selección del husillo es detallado por la empresa y consta de los pasos que se marcan en la (Figura 2.47.) [55]:



Figura 2.46. Procedimiento de selección de husillo de bolas recirculantes. Parte 1 (Fuente: [55])

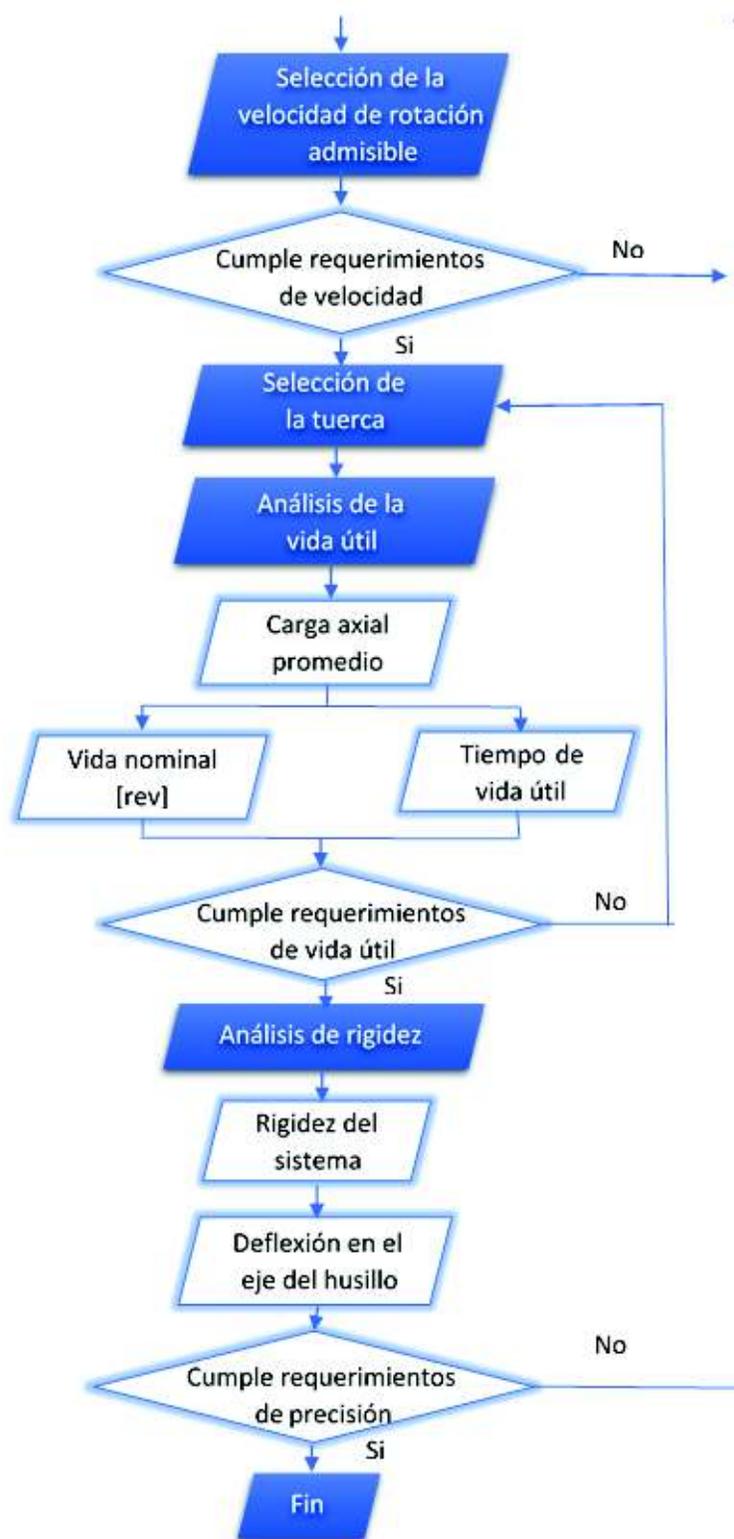


Figura 2.47. Procedimiento de selección de husillo de bolas recirculantes. Parte 2.
(Fuente: [55])

A continuación se denotan los pasos descritos en el mapa de cálculo presentado en la Figura 2.46 y la Figura 2.47.

1) Selección de la precisión del husillo de bolas

De acuerdo a la Tabla 2.14. (Tabla de especificaciones) se considera una precisión de posicionamiento de $\pm 0,05$ [mm] la cual se fijó debido al análisis de la competencia y en base al trabajo “DISEÑO DE MÁQUINA DE CORTE C.N.C CON 3 EJES” de Rodríguez de la Universidad Francisco José de Caldas de Colombia [32]. Como ejemplo de cálculo se selecciona el eje Z, con una longitud de desplazamiento de 570[mm].

Los diferentes tipos de husillos de bolas que ofrece THK permiten obtener diferentes niveles de precisión, para la selección de un husillo por su nivel de precisión es necesario conocer la demanda de precisión sobre el recorrido o rango de movimiento de acuerdo con la Ecuación (2.37.) [55].

$$N_p = \frac{\delta}{l} \quad (2.37.)$$

Donde:

N_p : Nivel de precisión.

δ : Demanda de precisión= $\pm 0,5$ [mm]

l : Rango de movimiento o carrera= 570[mm]

Se obtiene:

$$N_p = 0,000877$$

La precisión del ángulo de paso debe ser igual o mayor a 0,000877. Por lo tanto, del catálogo de THK (0) se selecciona el nivel C10 de precisión del husillo de bolas, que implica un error de distancia de recorrido de $\pm 0,21$ [mm]/300 [mm]

El nivel de precisión C10 está disponible tanto para husillos laminados como para husillos de bolas de precisión, siendo el primer tipo de husillos más barato debido a su proceso de producción. En este caso se elige un husillo de bolas laminado, ya que es más económico.

1.1) Estimación de la longitud

Como una primera aproximación de la longitud del husillo de bolas se estima una longitud total de tuerca de 100 [mm] y una longitud de extremo de husillo de 100 [mm], valores dados por THK considerando el espacio que ocupa la tuerca en el husillo (L_c) y un espacio libre para el acoplamiento del husillo al eje del servomotor (L_e) [55]. El parámetro l corresponde a la longitud del husillo sin considerarse L_c y L_e , este parámetro depende de

la configuración geométrica del sistema. Para una carrera de 350 mm l es igual a 570 mm
 La longitud total considerando el recorrido del husillo está dada por:

$$L_{Husillo} = l + L_c + L_e \quad (2.38.)$$

Al reemplazar los datos se tiene que la longitud del husillo debe ser:

$$L_{Husillo} = 570 + 100 + 100 = 770 \text{ mm}$$

2) Selección del paso

En este punto se establecen las velocidades máximas de giro del servomotor y la velocidad máxima de desplazamiento del carro en el eje Z. El paso del husillo se obtiene con la Ecuación (2.39) [55].

$$Paso = \frac{V_{\max} * 1000}{n_{\max}} \quad (2.39)$$

Donde:

V_{\max} : Velocidad máxima de desplazamiento en eje Z, obtenida de Tabla 2.14 (Tabla de especificaciones) y del análisis de la competencia: 12 [m/min]

n_{\max} : Velocidad máxima de giro de servomotor. Valor recomendado por THK = 3000[rpm] [55].

Paso: Distancia entre dos cuerdas o crestas adyacentes de un tornillo [mm].

Al reemplazar los datos en la ecuación (2.39) se tiene:

$$Paso = 4 \text{ [mm]}$$

3) Selección de un diámetro de eje de husillo de bolas

Dentro del catálogo de THK los diámetros de husillos de bolas laminados que más se apegan a los requisitos de paso y precisión descritos anteriormente, se detallan a continuación. Para más información véase ANEXO XI.

Tabla 2.61. Posibles diámetros de husillos en función del paso.

Diámetro [mm]	Paso [mm]
14	4
14	5
16	5
20	5

(Fuente: [55])

Para cálculos posteriores se selecciona el husillo de diámetro 14 mm y paso 4 mm, considerando requerimientos de exactitud y bajo costo.

4) Selección de un método de montaje

El método de montaje tiene influencia sobre la carga de pandeo del husillo y la velocidad de rotación admisible del mismo. Las configuraciones de montaje se presentan en la Figura 2.48.

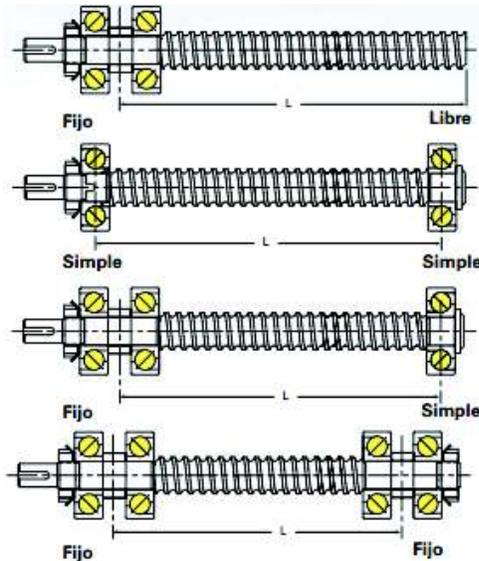


Figura 2.48. Métodos de montaje del eje del husillo
(Fuente: [43])

Se selecciona una configuración de montaje fijo-simple de acuerdo a NOOK [43] recomendado para aplicaciones de mecanizado.

5) Análisis de la carga axial admisible

Para proceder con el análisis de la carga axial en el carro del eje Z mediante un análisis de fuerzas resultantes, es necesario conocer previamente datos de aceleración y masas de los cuerpos en movimiento de dicho carro.

Para el cálculo de la aceleración que actúa en el movimiento sobre el eje Z utiliza la Ecuación (2.40).

$$a = \frac{V_{m\acute{a}x} * \frac{\text{min}}{60\text{seg}}}{t} \quad (2.40)$$

Donde:

Velocidad máxima: V_{max} 12 [m/min]

Tiempo de aceleración de servomotor: $t=0,25$ seg [56].

Por substitución de datos en la ecuación (2.40), se obtiene

$$a = 0,8 \text{ [m/seg}^2\text{]}$$

Para el cálculo de las masas, la Figura 2.49 muestra un esquema del carro del eje Z. Las masas consideradas corresponden a la masa del husillo CNC y a la masa de la placa de soporte de dicho husillo.

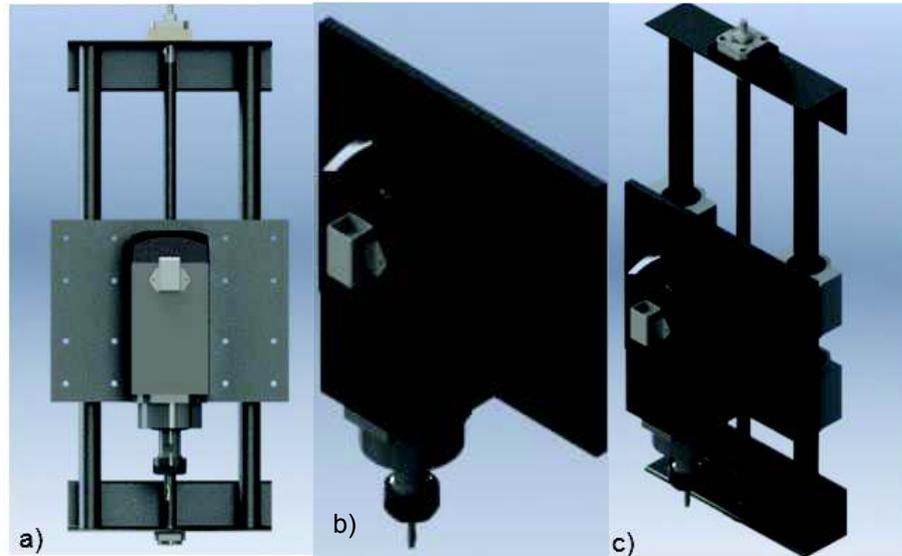


Figura 2.49. Carro del eje Z. Vista frontal (a), Placa y husillo CNC (b), Vista lateral (c)
(Fuente: Fuente Propia)

Los valores obtenidos se detallan a continuación.

Masa de husillo CNC: $m_1=10$ [kg]

Masa placa soporte de husillo CNC: $m_2= 4,4$ [kg] (Placa de acero al carbono - Figura 2.50).

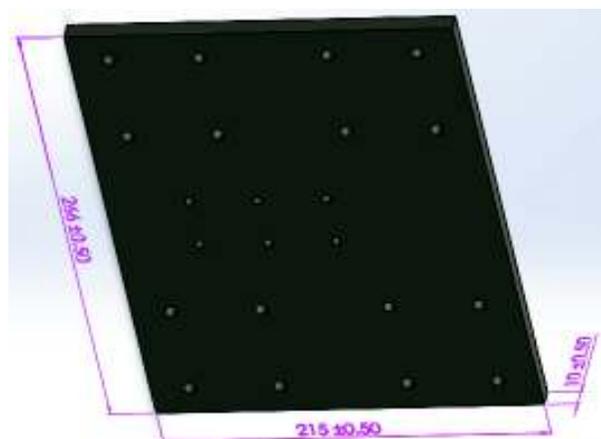


Figura 2.50. Soporte de Spindle CNC
(Fuente: Fuente Propia)

$$m_2 = (Base * Altura * Espesor) * densidad$$

$$m_2 = 4,4 [kg]$$

- Cálculos de la carga axial

Con el análisis de las fuerzas que actúan durante el desplazamiento del carro en el eje z, se puede obtener la carga axial. La fuerza o carga axial varía si el movimiento es acelerado, con velocidad constante, de ascenso o descenso. Se presenta a continuación un ejemplo para la obtención de dichas fuerzas en el caso de movimiento acelerado de ascenso, con respecto a la Figura 2.51:

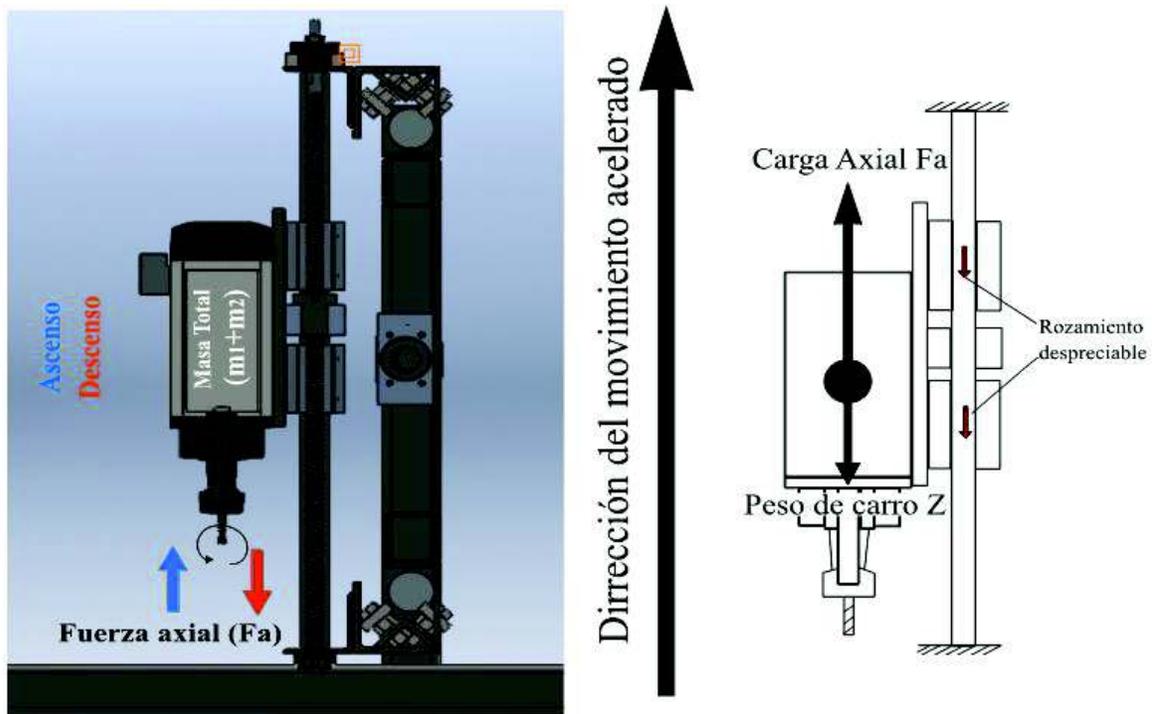


Figura 2.51. Diagrama de cuerpo libre en dirección axial del husillo del carro del eje Z.
(Fuente:[55])

La sumatoria de fuerzas según la segunda ley de Newton produce los siguientes resultados:

$$\sum F_z = (m_1 + m_2) * a$$

$$Fa_1 - (m_1 + m_2) * g = (m_1 + m_2) a$$

$$Fa_1 = (m_1 + m_2) * g + (m_1 + m_2) * a \quad (2.41)$$

$$Fa_1 = 160,59 [N]$$

Durante el movimiento uniforme hacia arriba:

$$Fa_2 = (m_1 + m_2) * g \quad (2.42)$$

$$Fa_2 = 148,47 \text{ [N]}$$

Durante la desaceleración hacia arriba:

$$Fa_3 = (m_1 + m_2) * g - (m_1 + m_2) * a \quad (2.43)$$

$$Fa_3 = 136,35 \text{ [N]}$$

Durante la aceleración hacia abajo

$$Fa_4 = (m_1 + m_2) * g - (m_1 + m_2) * a \quad (2.44)$$

$$Fa_4 = 136,35 \text{ [N]}$$

Durante el movimiento uniforme hacia abajo

$$Fa_5 = (m_1 + m_2) * g \quad (2.45)$$

$$Fa_5 = 148,47 \text{ [N]}$$

Durante la desaceleración hacia abajo

$$Fa_6 = (m_1 + m_2) * g + (m_1 + m_2) * a \quad (2.46)$$

$$Fa_6 = 160,59 \text{ [N]}$$

Para los cálculos posteriores se tomará el mayor valor de la carga axial (160.59 [N]) y se realiza el análisis con el husillo de diámetro 14mm y paso de 4mm.

- Carga de pandeo en el eje de husillo

Cumpliendo con los anteriores requerimientos como son: husillo de bolas laminado con nivel de precisión C10, de diámetro 14mm y paso 4mm, se selecciona en primera instancia un husillo de bolas laminado modelo BTK1404-V-3,6. Con este husillo se procede a calcular la carga que provocará el pandeo en el eje del husillo según la Ecuación (2.47) y los datos del catálogo de THK (ANEXO XII). Se debe tener en cuenta que la Ecuación (2.47) se multiplica por un factor de 0.5 como medida de seguridad.

$$P = \frac{n_1 \pi^2 EI}{l_a^2} 0.5 = n_2 * \frac{d_1^4}{l_a^2} * 10^4 \quad (2.47)$$

Donde:

P: Carga de pandeo [N]

l_a: Distancia entre dos superficies de montaje =670 [mm] (estimado)

E: Módulo de Young = 2,06*10⁵ [N/mm²]

I: Momento de inercia del eje: $I = \frac{\pi}{64} d_1^4$

n₁ y n₂: Factores según el método de montaje. El método de montaje depende de la posición en la que se encuentre el husillo, sea ésta vertical u horizontal. En el caso del eje Z se tiene una disposición vertical, lo cual corresponde a factores de 2 y 10 respectivamente (fijo con soporte) [55].

d₁: Distancia menor de la rosca del eje husillo= 11,5 [mm][55].

Por substitución en la ecuación (2.47) se tiene:

$$P = 3896,20 \text{ [N]}$$

- Carga de tracción y compresión admisible del eje del husillo

Adicionalmente al cálculo de pandeo, es importante realizar un análisis de la carga de tracción admisible en relación con el esfuerzo de deformación sobre el eje del husillo a partir de la Ecuación (2.48) [55].

$$P_2 = \sigma \frac{\pi}{4} d_1^2 = 116 * d_1^2 \quad (2.48)$$

Donde:

P₂: Carga de tracción admisible

σ: Esfuerzo de tracción admisible = 147 [MPa] [55].

d₁: Distancia menor de la rosca del eje husillo= 11,5 [mm] [55].

El valor resultante es:

$$P_2 = 15341 \text{ [N]}$$

6) Análisis de velocidad de rotación admisible

Cuando la velocidad de rotación se incrementa a altos valores, el husillo de bolas puede entrar en resonancia y dejar de cumplir con sus funciones [55]. Por lo tanto, se debe elegir un husillo capaz de trabajar por debajo de dicho punto de resonancia, denominado velocidad de rotación peligrosa o crítica [6, 8].

- Cálculo de la velocidad crítica

El cálculo de esta velocidad es dependiente del diámetro del husillo, la longitud del tramo sin apoyo, y la fijación de los extremos (Ecuación (2.49) [55]).

$$N_1 = \frac{60 * \lambda_1^2}{2\pi * l_a^2} * \sqrt{\frac{E * 10^3 * I}{\gamma A}} * 0,8 = \lambda_2 * \frac{d_1}{l_a^2} * 10^7 \quad (2.49)$$

Donde:

N_1 = Velocidad peligrosa del eje del husillo [rpm]

l_a : Distancia entre dos superficies de montaje =670 [mm] (estimado)

d_1 : Distancia menor de la rosca del eje husillo= 11,5 [mm] [55].

E: Módulo de Young = $2,06 * 10^5$ [N/mm²]

I: Momento de inercia del eje: $I = \frac{\pi}{64} d_1^4$

γ : Densidad (gravedad específica) = $7,85 * 10^{-6}$ [kg/mm³]

A: Área transversal del eje del husillo: $A = \frac{\pi}{4} d_1^2$

λ_1 y λ_2 = Factor según el método de montaje (fijo con soporte)=15,1 [55]

Se obtiene el siguiente resultado:

$$N_1 = 3868,34 \text{ [rpm]}$$

- Velocidad de rotación admisible determinada por el valor DN

Adicionalmente, la velocidad máxima admisible de un husillo se limita por un valor de velocidad de rotación máxima en función del diámetro del husillo (DN). Este valor considera el método de recirculación de bolas dependiente del modelo de husillo seleccionado, y el diámetro de bolas centro a centro.

THK provee una serie de ecuaciones para los diferentes modelos de husillos que oferta (ANEXO XIII). Para el caso de estudio se utiliza la Ecuación (2.50) [55].

$$N_2 = \frac{100000}{D} \quad (2.50)$$

Donde:

D= Diámetro de bolas centro a centro=14,4 [mm]

Se obtiene

$$N_2 = 6944,44 \text{ [rpm]}$$

Una vez obtenida la velocidad crítica, se compara este valor con la velocidad de rotación máxima del servomotor preseleccionado (3000 rpm valor recomendado por THK). Se observa que la velocidad del servomotor se encuentra por debajo de las revoluciones de las velocidades peligrosas anteriormente calculadas. Se puede decir entonces que el husillo tendrá un correcto funcionamiento y no entrará en resonancia.

7) Selección del modelo de tuerca.

Con un diámetro de 14mm y un paso de 4 mm la tuerca tendría el código BTK 1404V-3,6 con una capacidad de carga básica, $C_a = 5,5 \text{ kN}$, y una capacidad de carga estática, $C_{0a}=11,5 \text{ kN}$.

- Análisis de carga axial en tuerca

$$F_{a_{\max}} = \frac{C_{0a}}{f_s} \quad (2.51)$$

$F_{a_{\max}}$: Carga axial permitida

C_{0a} : Capacidad de carga estática básica= 11,5 kN

f_s : Factor de seguridad estático = 2,5

Diseñándose una máquina herramienta y considerando imprevistos fuera del funcionamiento normal de la máquina como vibraciones o impactos, se tiene un factor de seguridad estático de 2.5 (Tabla 2.62).

Tabla 2.62. Factor de seguridad en función del tipo de sistema.

Máquina que utiliza el sistema LM	Condiciones de Carga	Límite más bajo de fs
Maquinaria industrial general	Sin vibración ni impacto	1,0 a 3,5
	Con vibración o impacto	2,0 a 5,0
Máquina-herramienta	Sin vibración ni impacto	1,0 a 4,0
	Con vibración o impacto	2,5 a 7,0

(Fuente: [55])

Reemplazando valores en la Ecuación (2.51) se tiene:

$$F_{a_{\max}} = 4,6 \text{ [kN]} = 4600 \text{ [N]}$$

La carga axial admisible por la tuerca es mayor que la carga axial máxima de 134,73 [N]; por lo tanto, esta tuerca cumple con los requerimientos.

8) Análisis de vida útil

- Cálculo de la distancia de recorrido

La distancia de recorrido está dada por la ecuación (2.52).

$$l_1 = l_3 = \frac{V_{\max} * t}{2} * 1000 \quad (2.52)$$

Donde:

l_1 y l_3 : Distancia recorrida durante la aceleración y desaceleración respectivamente.

V_{\max} : Velocidad máxima de máquina de herramienta = 12 [m/min]

t: Tiempo de aceleración y desaceleración= 0,25 seg

De lo cual se obtiene:

$$l_1 = l_3 = 25 \text{ [mm]}$$

La distancia recorrida con movimiento uniforme, considerando que la tuerca recorre toda la longitud del tornillo está dada por la Ecuación (2.53).

$$l_2 = l_{\text{total}} - l_1 - l_3 \quad (2.53.)$$

Donde

l_1 y l_3 : Distancia recorrida durante el movimiento con velocidad constante.

l_1 y l_3 : Distancia recorrida durante la aceleración y desaceleración respectivamente= 25[mm]

l_{total} : longitud total de husillo de bolas recirculantes = 770 [mm]

Se obtiene que:

$$l_2 = 720 \text{ [mm]}$$

- Carga axial promedio

La carga axial promedio que actúa sobre el husillo viene dada por la Ecuación (2.54):

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_{a1}^3 * l_1 + F_{a2}^3 * l_2 + F_{a3}^3 * l_3 + F_{a4}^3 * l_1 + F_{a5}^3 * l_2 + F_{a6}^3 * l_3}{2 * (l_1 + l_2 + l_3)}} \quad (2.54)$$

Donde:

F_m : Carga axial promedio [N]

$F_{a1} = F_{a4}$: Durante la aceleración hacia arriba = 160,59 [N]

$F_{a2} = F_{a5}$: Durante el movimiento uniforme hacia arriba = 148,47 [N]

$F_{a3} = F_{a6}$: Durante la desaceleración hacia arriba = 136,35 [N]

l_1 y l_2 : Distancia recorrida durante la aceleración y desaceleración = 25 [mm]

l_3 : Distancia recorrida de movimiento uniforme = 720 [mm]

Por sustitución de los valores en la ecuación (2.54) se obtiene:

$$F_m = 117,89 \text{ [N]}$$

- Vida Nominal

Para la obtención de la vida nominal del husillo se debe utilizar la ecuación (2.55) que se encuentra a continuación:

$$L = \left(\frac{Ca}{f_w * F_m} \right)^3 * 10^6 \quad (2.55)$$

Donde:

L: Vida nominal [rev]

f_w : Factor de carga. Dicho valor se obtiene de la Tabla 2.63. En éste caso de estudio el sistema va a ser diseñado para vibraciones e impactos leves, por lo cual $f_w = 1,2$

C_a : Capacidad de carga dinámica= 5500 [55].

F_m =Carga media= 117,89 [N]

Tabla 2.63. Factor de Carga

Vibraciones/Impactos	Velocidad(V)	f_w
Leves	Muy baja $V \leq 0,25 \text{m/s}$	1 a 1,2
Débiles	Lenta $0,25 < V \leq 1 \text{m/s}$	1,2 a 1,5
Medio	Media $1 < V \leq 2 \text{m/s}$	1,5 a 2
Fuertes	Alta $V > 2 \text{m/s}$	2 a 3,5

(Fuente: [55])

Al sustituir los valores en la ecuación (2.55) se obtiene

$$L = 5,88 * 10^{10} \text{ [rev]}$$

El valor de vida nominal dado en revoluciones, no es tan fácil de interpretar, por tal motivo se lo transformará su equivalente en horas a continuación.

- Tiempo de vida útil

Para conocer el tiempo de uso o vida útil del husillo seleccionado se utiliza la Ecuación (2.56) [55].

$$L_h = \frac{L}{60 * N_m} \quad (2.56)$$

Donde:

L_h = Tiempo de vida útil

N_m = Revoluciones por minuto= 3000 [min^{-1}]

L: Vida nominal [rev]

Por lo cual se obtiene que:

$$L_h = 429545,02 \text{ [horas]}$$

El tiempo de vida útil calculado es equivalente a aproximadamente 49 años. Las especificaciones técnicas propuesta para el diseño (Tabla 2.14) establecen una garantía de 1 año. Se comprueba el cumplimiento del husillo de bolas en este aspecto.

9) Análisis de rigidez

En este punto se pone en consideración la deflexión en el husillo de bolas causado por la fuerza de corte. La deflexión tiene una relación inversamente proporcional con la rigidez. La rigidez del husillo se puede encontrar mediante la Ecuación (2.57).

- Rigidez del husillo

La rigidez del husillo se puede calcular con la Ecuación (2.57).

$$K_s = \frac{A * E}{1000 * L} \quad (2.57)$$

Donde:

A: Área transversal del eje del husillo: $A = \frac{\pi}{4} d_1^2$

l_a: Distancia entre dos superficies de montaje = 670mm (estimado)

d₁: Distancia menor de la rosca del eje husillo = 11,5mm [55].

E: Módulo de Young = 2,06*10⁵ [N/mm²]

Al reemplazar los datos en la ecuación (2.57) se obtiene que la rigidez del husillo es:

$$K_s = 31,94 \text{ [N/}\mu\text{m]}$$

- Rigidez axial de la tuerca

Del catálogo de THK se obtiene que la rigidez axial de la tuerca de un husillo de bolas modelo BTK1404V-3,6 es K_t = 150 [N/μm].

- Rigidez axial del sistema de husillo

La rigidez del sistema conformado por el husillo y tuerca con recirculación de bola, viene dada por la Ecuación (2.58).

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_t} \quad (2.58)$$

Donde:

K: Rigidez axial del sistema de husillo [N/ μ m]

Ks: Rigidez axial del eje = 31,93 [N/ μ m]

Kt: Rigidez axial de la tuerca = 150 [N/ μ m]

Por lo cual se tiene que:

$$K = 26,33 [N / \mu m]$$

- Deflexión en el eje del husillo

Para cuantificar la deformación sufrida por el husillo de bolas se encuentra la deflexión del mismo con la Ecuación (2.59).

$$\delta = \frac{Fa}{K} \quad (2.59)$$

Donde:

δ = Desplazamiento elástico del sistema de husillo en la dirección axial

Fa: Carga axial aplicada = 160,59 [N]

K: Rigidez axial del sistema de husillo = 26,49 [N/ μ m]

Se obtiene:

$$\delta = 6,09 \mu m = 0,006 [mm]$$

Debido a que la precisión propuesta para el diseño del sistema de posicionamiento CNC es de $\pm 0,5$ mm y la deflexión no supera este valor, la preselección del husillo de bolas se considera adecuada.

2.4.5.3.2. Torque máximo y torque efectivo de servomotores

Se puede proceder a la selección de los servomotores como se detalla a continuación en la Figura 2.52:



Figura 2.52. Procedimiento de selección de servomotor.
(Fuente:[58])

Para iniciar la selección de los servomotores se procederá a seguir con los pasos detallados anteriormente, de forma secuencial.

- 1) Cálculo de inercia de la carga
 - Inercia del husillo de bolas

La inercia que ofrece un husillo de bolas viene dado por la Ecuación (2.60) [58].

$$J_H = \frac{M_H D^2}{8} * 10^{-6} \quad (2.60)$$

Donde:

M_H : Masa del husillo de bolas [kg]

D : Diámetro del husillo de bolas= 14 [mm]

J_H : Inercia del husillo de bolas [kg m²]

La inercia del husillo de bolas será calculada considerando que éste está hecho de acero con una densidad de 7900 kg/m³ [42].

La masa está dada por la Ecuación (2.61) que se detalla a continuación:

$$M_H = \text{área} * \text{longitud} * \text{densidad} = \frac{\pi D^2}{4} * l * \rho \quad (2.61)$$

$$M_H = 0,93 \text{ [kg]}$$

Entonces la inercia del husillo resulta:

$$J_H = \frac{0.93 * 14^2}{8} * 10^{-6}$$

$$J_H = 2,29 * 10^{-5} \text{ [kg m}^2\text{]}$$

- Inercia de carga a ser desplazada.

Considerando que se desea desplazar al spindle CNC y su placa de soporte la inercia del conjunto está dada por la Ecuación (2.62) [58].

$$J_C = M \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 * 10^{-6} \quad (2.62)$$

Donde:

M : Masa total de la carga a ser desplazada. Masa de spindle = 10[kg] y masa de carro Z= 2.71 [kg]

P : paso de husillo de bolas = 4 [mm]

Por lo cual la inercia del conjunto es:

$$J_C = 6,14 * 10^{-6} \text{ [kg m}^2\text{]}$$

Entonces la inercia total del sistema considerando al husillo de bolas y a la carga sería (Ecuación (2.63)):

$$J_{Total} = J_H + J_C \quad (2.63)$$

$$J_{Total} = 2,91 * 10^{-5} \text{ [kg m}^2\text{]}$$

2) Torque necesario para mover carga

El torque para mover el carro Z de forma ascendente y descendente viene dado por la Ecuación (2.64) [58].

$$T_w = Mg \frac{P}{2\pi} * 10^{-3} \quad (2.64)$$

Donde:

T_w : Torque para mover la carga

M: Masa total de la carga a ser desplazada. Masa de spindle = 10[kg] y masa de carro Z = 2,71 [kg]

P: paso de husillo de bolas = 4 [mm]

Por sustitución en la ecuación (2.64) se tiene:

$$T_w = 0,094 \text{ [Nm]}$$

3) Preselección de servomotor

Para la selección de los servomotores se ha optado por la marca OMRON. Se seleccionará servomotores de la serie OMNUC U. Para una primera preselección inicial se considera el cumplimiento de los siguientes parámetros de inercia de servomotor de la Ecuación (2.65) [59].

$$J_m \geq \frac{J_{Total}}{30} \quad (2.65)$$

Donde:

J_m : Inercia de servomotor [kg m²]

J_{Total} : Inercia total de carro Z = 2,91*10⁻⁵ [kg m²]

Al sustituir los datos en la ecuación (2.65) se obtiene la inercia mínima del servomotor:

$$Jm = 9,69 * 10^{-7} \text{ [kg m}^2\text{]}$$

De igual manera se tiene que el torque del servomotor se encuentra lo obtiene de la ecuación (2.66).

$$Tm * 0.8 \geq T_w \quad (2.66)$$

Donde:

Tm: Torque de servomotor [Nm]

T_w: Torque para mover la carga = 0,094 [Nm]

Por lo cual el torque mínimo que debe poseer del servomotor seria:

$$Tm = 0,118 \text{ [Nm]}$$

Del catálogo de OMRON se selecciona provisionalmente el modelo de servomotor R88M-U0503 con las siguientes características [59].

Tm: Torque de servomotor = 0,159 [Nm]

Jm: Inercia de servomotor = $2,6 * 10^{-5}$ [kg m²]

4) Torque de aceleración y desaceleración

Considerando que el movimiento del carro en Z describe un perfil de velocidad trapezoidal, se tendrá zonas de aceleración y desaceleración en el sistema donde el torque que actúa para producir el movimiento de aceleración viene dado por la Ecuación (2.67) [58].

$$T_A = \frac{2\pi * N}{60 * t_A} \left(Jm + \frac{J_{Total}}{\eta} \right) \quad (2.67)$$

Donde:

T_A: Torque de aceleración y torque de desaceleración

N: Revoluciones máximas del husillo = 3000[rpm]

t_a: Tiempo de aceleración del sistema = 0,25 [s]

η: Eficiencia de transmisión de movimiento de husillo de bolas = 0,9

Jm: Inercia de servomotor = $2,6 * 10^{-5}$ [kg m²]

J_{Total} : Inercia total de carro $Z = 2,91 \cdot 10^{-5}$ [kg m²]

Al sustituir los valores en la Ecuación (2.55) se tiene:

$$T_A = 0,044 \text{ [Nm]}$$

5) Torque máximo

Corresponde a la suma del torque en la sección de aceleración más el torque necesario para desplazar la carga.

$$T_{\text{max}} = T_W + T_A \quad (2.68)$$

Donde:

T_A : Torque de aceleración y torque de desaceleración = 0,044 [Nm]

T_W : Torque para mover la carga = 0,094 [Nm]

Por lo cual al reemplazar los datos en la ecuación (2.68) se tiene:

$$T_{\text{max}} = 0,14 \text{ [Nm]}$$

6) Torque efectivo del servomotor

Cuando el torque requerido por el motor varia continuamente con el tiempo se puede tener un estimado al calcular el torque efectivo del servomotor (Ecuación (2.69.) [58]).

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{T_1^2 * t_1 + T_2^2 * t_2 + T_3^2 * t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \quad (2.69.)$$

Los valores necesarios para calcular el torque efectivo se pueden visualizar de manera gráfica en la Figura 2.53.

Donde:

T_1 : Torque máximo del servomotor = 0,14 [Nm]

T_2 : Torque debido a la carga total = 0,094 [Nm]

T_3 : Torque de frenado = $T_W - T_A = 0,05$ [Nm]

$t_1 = t_3$: Tiempo de aceleración/desaceleración = 0,25 [s]

t_2 : Tiempo de trabajo = 59,58 [s]

t_4 : Tiempo de pausa = 2 [s]

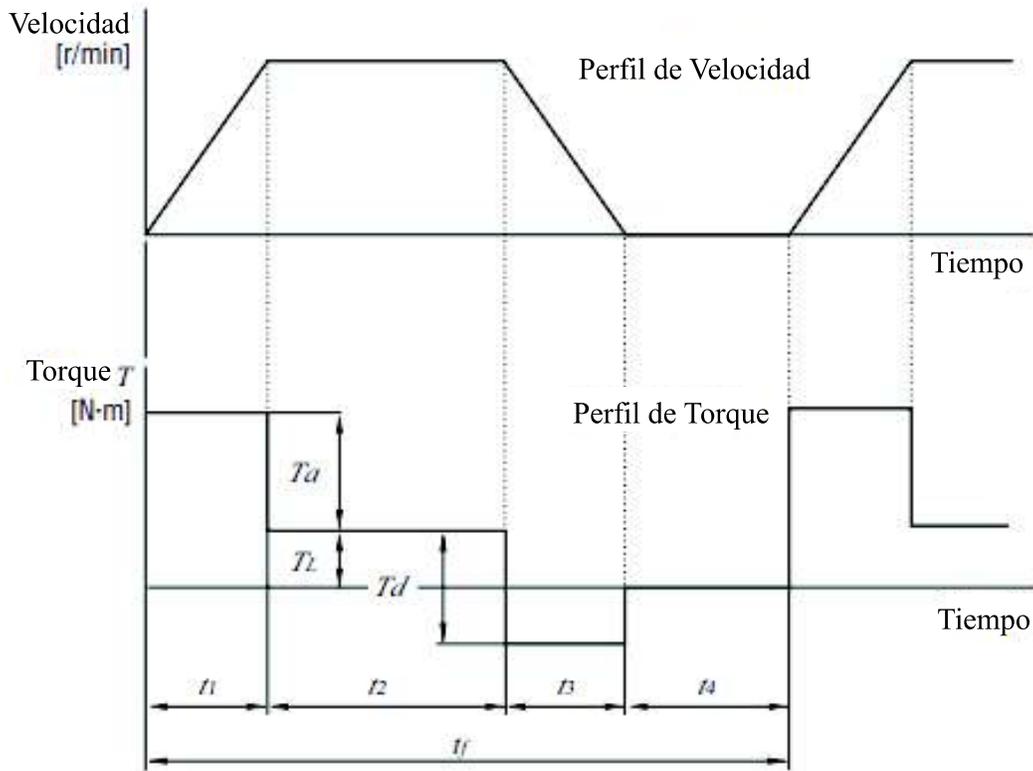


Figura 2.53. Perfil de velocidad y torque de los carros de máquina CNC.
(Fuente: [59])

Al sustituir los valores en la ecuación (2.69.) se tiene el torque efectivo del servomotor.

$$T_{rms} = 0,093 \text{ [Nm]}$$

2.5. Evaluación de parámetros

2.5.1. Módulo 1

2.5.1.1. Estructura de soporte

Del análisis de fuerzas realizado para el cálculo de ejes guías en el módulo 2 (Subcapítulo 2.4.5.2.2) se obtiene los valores de las reacciones y momentos que actúan en los extremos de los ejes guías. El resumen de datos se presenta en la Tabla 2.64.

Tabla 2.64. Reacciones y momentos sobre estructura de soporte.

	Reacciones		Momentos	
	R1 [N]	R2 [N]	M1 [Nm]	M2 [Nm]
Eje X	798,00	305,00	177,90	94,20
Eje Y	543,00	263,70	111,20	73,60
Eje Z	1239,60	433,90	141,31	73,17

(Fuente: Propia).

La ubicación de las reacciones en X y Z se presenta en la Figura 2.54 y las reacciones de Y se presentan en Figura 2.55.

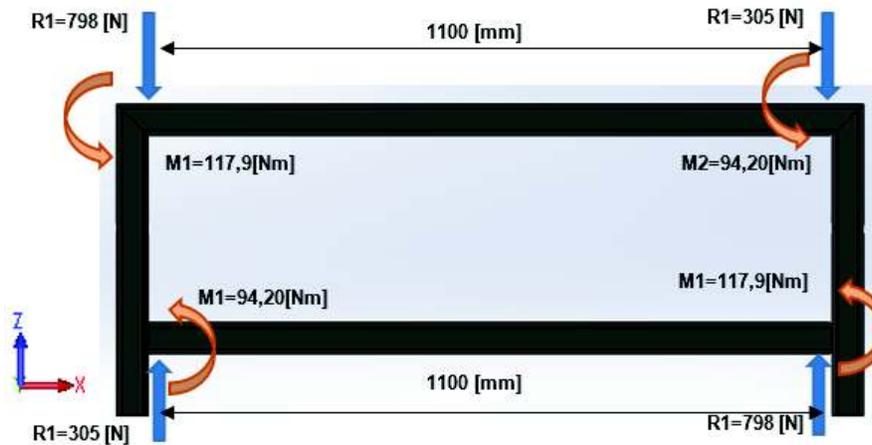


Figura 2.54. Fuerzas que actúan sobre la estructura X y Z
(Fuente: Propia)

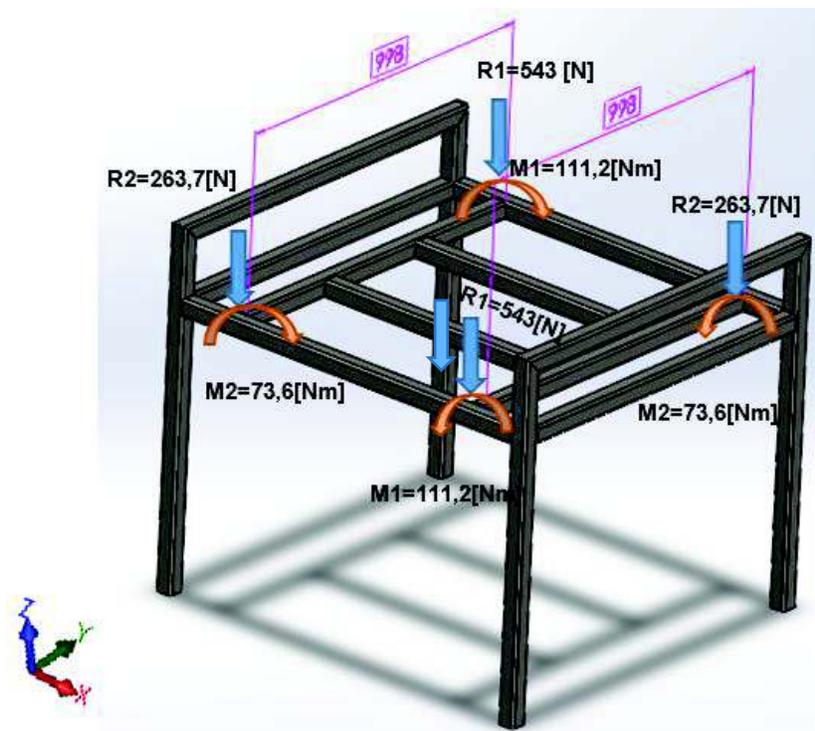


Figura 2.55. Fuerzas que actúan sobre la estructura Y
(Fuente: Propia)

Para verificar que la estructura cumple con los requerimientos de diseño, se procedió a simular su comportamiento con ayuda de Solidworks 2016. Se realizó un estudio estático considerando que las cargas son aplicadas de manera puntual. Los resultados de las tensiones y desplazamientos a los cuales es sometida la estructura se observa en la Figura 2.56 y Figura 2.57. El informe generado por Solidworks 2016, con datos adicionales de la simulación, se incluye en el ANEXO XV.

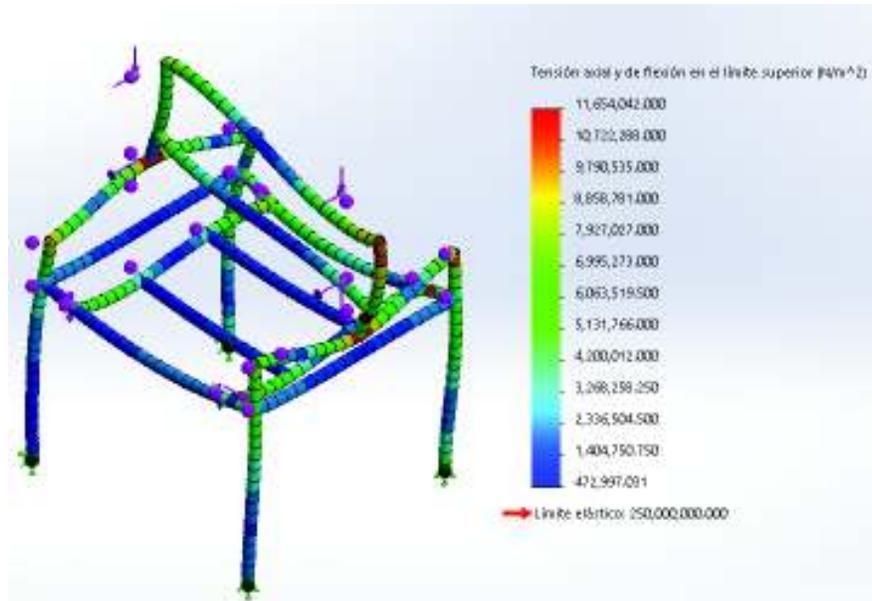


Figura 2.56. Tensiones aplicadas sobre estructura de soporte.
(Fuente: Propia)

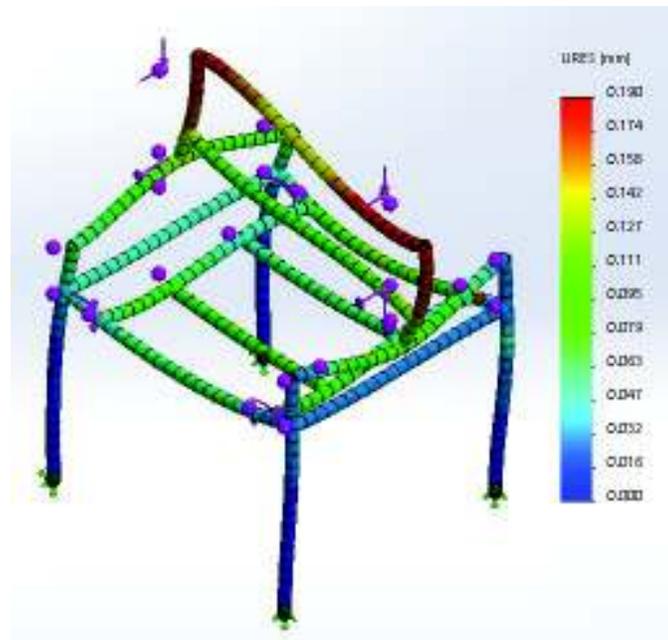


Figura 2.57. Desplazamientos de la estructura de soporte.
(Fuente: Propia)

Por último, la Tabla 2.65 presenta los valores máximos de tensión y desplazamiento a los que se somete la estructura, junto al factor de seguridad mínimo resultante (Véase Figura 2.58.)

Tabla 2.65. Tensión, desplazamiento y factor de seguridad de estructura de soporte.

	Tensión máxima	Desplazamiento máximo	Factor de seguridad mínimo.
Estructura de soporte	11,65 [MPa]	0,190 [mm]	21,45

(Fuente: Propia)

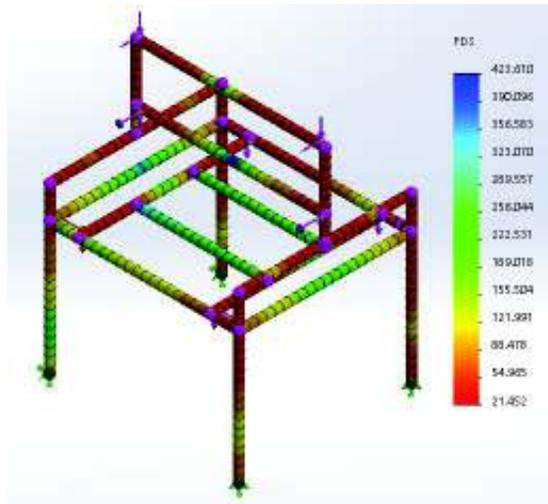


Figura 2.58. Factor de seguridad para la estructura de soporte.
(Fuente: Propia)

En base al mínimo factor de seguridad obtenido en la simulación se afirma que la estructura es capaz de soportar las cargas a las cuales está sometida durante el proceso de mecanizado debido a que este valor se encuentra dentro del rango recomendado por Rutheravan de la Universidad de Pahang en Malasia en su trabajo “SUMMARY OF SAFETY CRITERIA IN DESIGN”, el cual dice que el factor de seguridad se debe ser mínimo de 4 para estructuras de acero en máquinas [60].

La simulación realizada en SOLIDWORKS se valida mediante la calidad del mallado. El parámetro utilizado para evaluar la calidad de la malla fue el número Jacobiano, el cual define qué tan homogéneos son los elementos de la malla. Un Jacobiano igual a uno representa un elemento perfectamente formado [61]. Para la simulación realizada se puede observar la Figura 2.59 donde se encuentra la estructura de soporte con su malla y el número Jacobiano a lo largo de la misma.

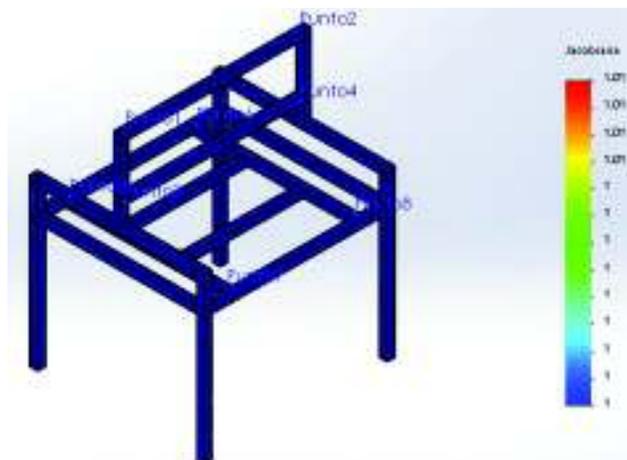


Figura 2.59. Numero jacobiano a lo largo de la malla para estructura de soporte.
(Fuente: Propia)

2.5.2. Módulo 3

2.5.2.1. Ejes Guías

En la selección de los ejes guías para cada eje se controla el factor de seguridad a fatiga y la deflexión máxima de los ejes. Los cálculos se los realiza de acuerdo al apartado 2.4.5.2.

En primer lugar se realiza un diagrama de cuerpo libre de cada eje y se señala los puntos de reacción de las fuerzas activas y pasivas. Para validar los resultados, se realiza una simulación de esfuerzos de deformación en SolidWorks Simulation.

2.5.2.1.1. Eje Z.

El análisis del eje Z se realiza tomando en cuenta que el eje circular se encuentra empotrado en ambos extremos y que la fuerza puntual se ejerce a lo largo del eje (Figura 2.60), Las distancias a las que el esfuerzo y la deflexión son máximos se identifican en la Tabla 2.66 y los resultados de diferentes diámetros se muestran en la Tabla 2.67.

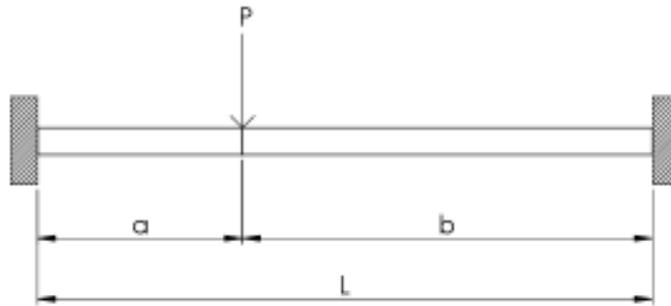


Figura 2.60. DCL eje guía del Eje Z
(Fuente: Propia)

Tabla 2.66. Datos eje guía del Eje Z

	Carga		Distancias	
	P [N]	a [mm]	b [mm]	L [mm]
Esfuerzo máx.	1673,45	190	380	570
Deflexión máx.		285	285	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.67. Resultados de ejes guías en el Eje Z.

Diámetro d [mm]	Limite a fatiga Se [Mpa]	Esfuerzo máx [Mpa]	F. seguridad n	Deflexión máx [mm]
16	120,644	351,418	0,343	2,509
20	117,797	179,926	0,655	1,028
25	115,018	92,122	1,250	0,421
30	112,796	53,311	2,116	0,203
35	110,951	33,572	3,305	0,110

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.61 y la Figura 2.62 se presenta el diagrama de fuerza cortante y el diagrama de momento flector del eje guía del eje Z respectivamente. Para este caso se toma en cuenta que la fuerza se coloca a 1/3 de la longitud total del eje, debido a que en este punto el eje presenta el mayor esfuerzo.

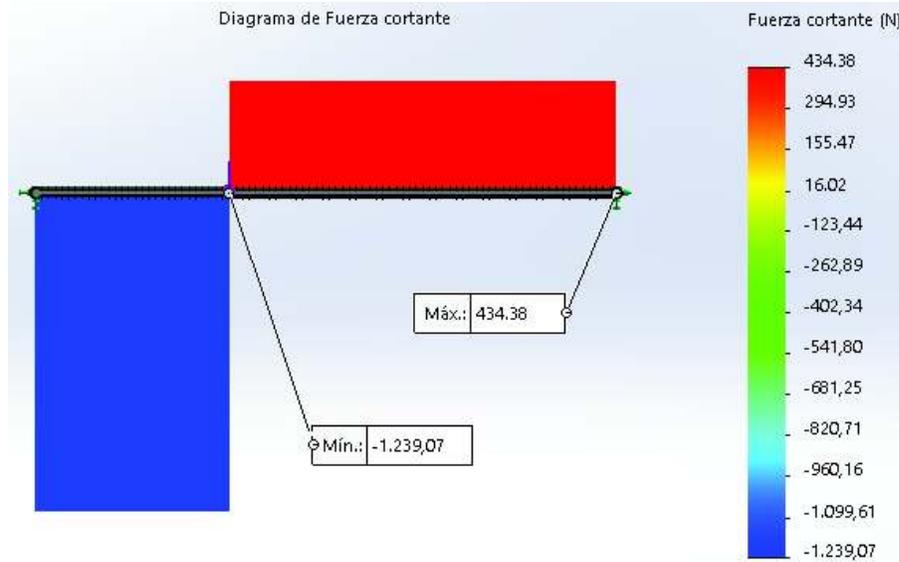


Figura 2.61. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje Z
(Fuente: Propia)

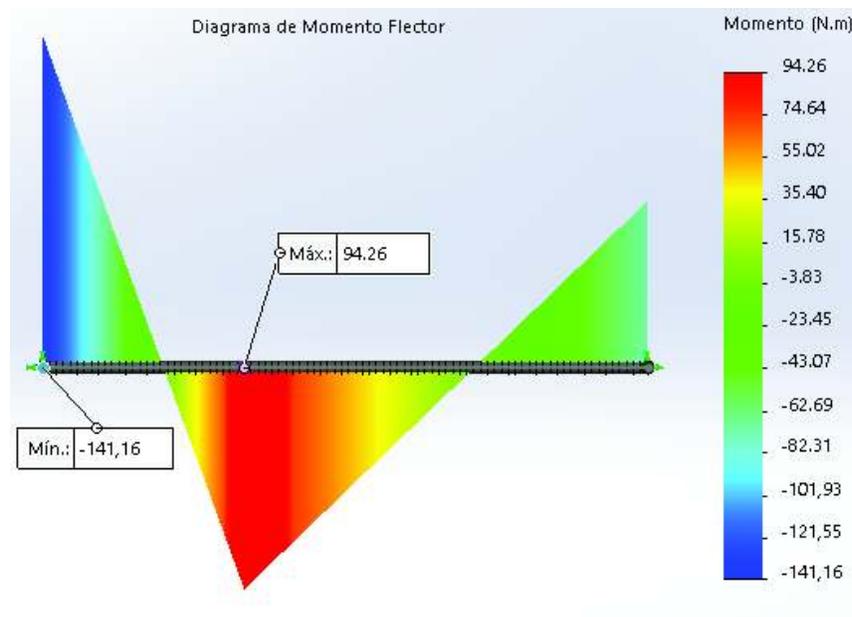


Figura 2.62. Diagrama de Momento Flector del Eje Z
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.63 se puede observar el Diagrama de Esfuerzo vs. Deflexión de las Guías del eje Z. Se aprecia que existe una mayor concentración de esfuerzos en la punta del empotramiento más cercano a la fuerza y en el punto de carga, además de que la mayor deflexión está en el punto de carga.

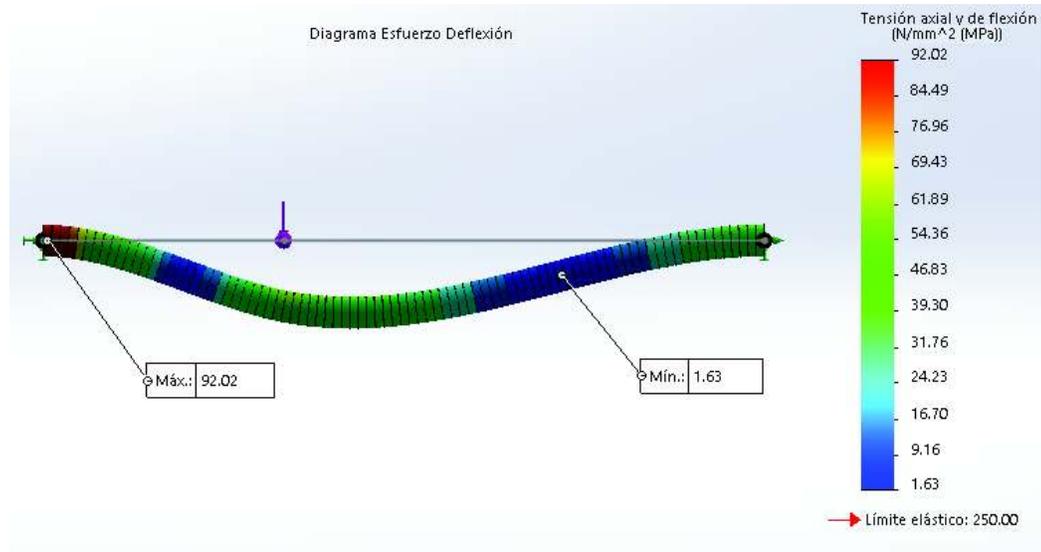


Figura 2.63. Diagrama de Esfuerzo Deflexión del Eje Z
(Fuente: Propia)

La Figura 2.64 muestra el punto de deflexión máxima, que se produce cuando la fuerza actúa en la mitad de la longitud del eje guía.

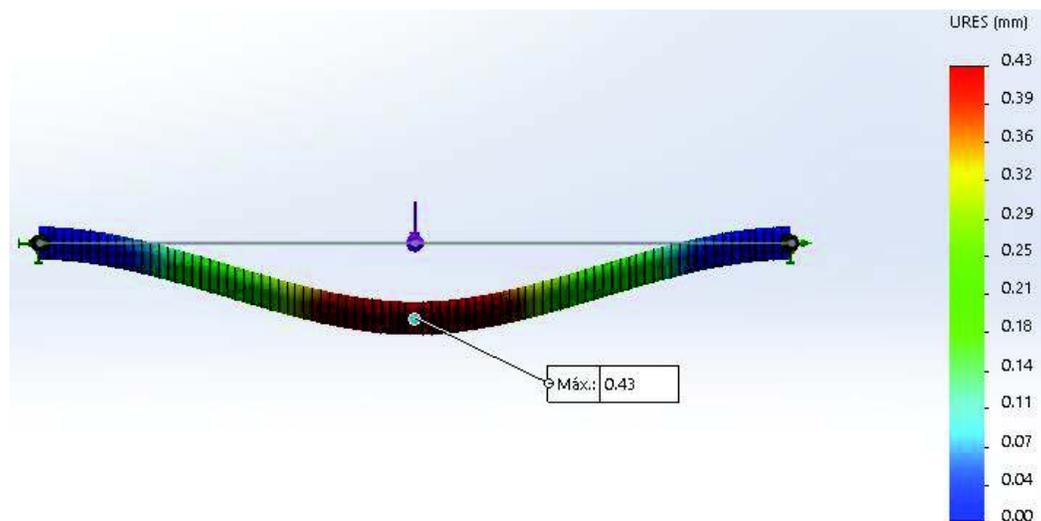


Figura 2.64. Diagrama de Deflexión del Eje Z
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.68 se presenta la comparación entre los principales resultados obtenidos para el eje Z de manera teórica y por medio de simulación.

Tabla 2.68. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje Z

Eje Z			
Parámetro	Teórico	Simulación	Error %
Momento máximo [Nm]	141,31	141,16	0,11%
Esfuerzo máximo [Mpa]	92,12	92,02	0,11%
Deflexión máxima [mm]	0,42	0,43	2,16%

(Fuente: Propia)

2.5.2.1.2. Eje X

En el eje X se consideran los dos extremos empotrados y una fuerza puntual a lo largo del eje (Figura 2.65). Los datos en la Tabla 2.69 son las distancias y fuerzas aplicadas en el eje. En la Tabla 2.70. se incluye los resultados de esfuerzo y deformación para varios diámetros de eje.

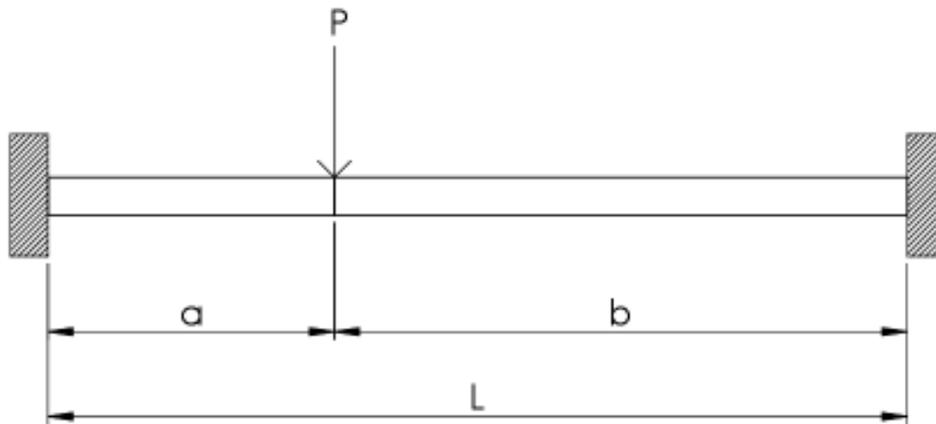


Figura 2.65. DCL eje guía del Eje X
(Fuente: Propia)

Tabla 2.69. Datos eje guía del Eje X

	Carga		Distancias	
	P [N]	a [mm]	b [mm]	L [mm]
Esfuerzo máx.	1103,09	377,33	754,66	1132
Deflexión máx.		566	566	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.70. Resultados de ejes guías en el Eje X.

Diámetro d [mm]	Limite a fatiga Se [Mpa]	Esfuerzo máx [Mpa]	F. seguridad n	Deflexión máx [mm]
25	115,018	120,596	0,954	2,173
30	112,796	69,789	1,616	1,048
35	110,951	43,949	2,525	0,566
40	109,377	29,442	3,715	0,332
50	106,796	15,075	7,085	0,136

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.66 y en la Figura 2.67 se puede observar el diagrama de fuerza cortante y momento flector respectivamente. Se observa que el momento máximo se produce en el extremo izquierdo donde está empotrado el eje, mientras que el segundo momento más alto se produce en el punto de aplicación de la carga.

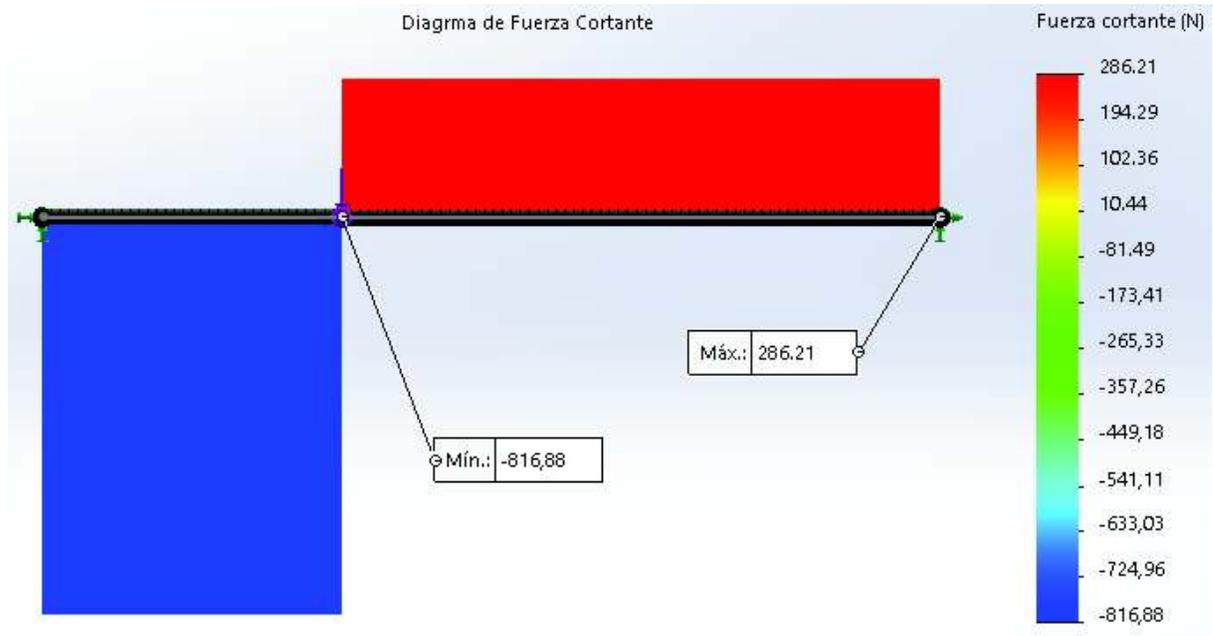


Figura 2.66. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje X
(Fuente: Propia)

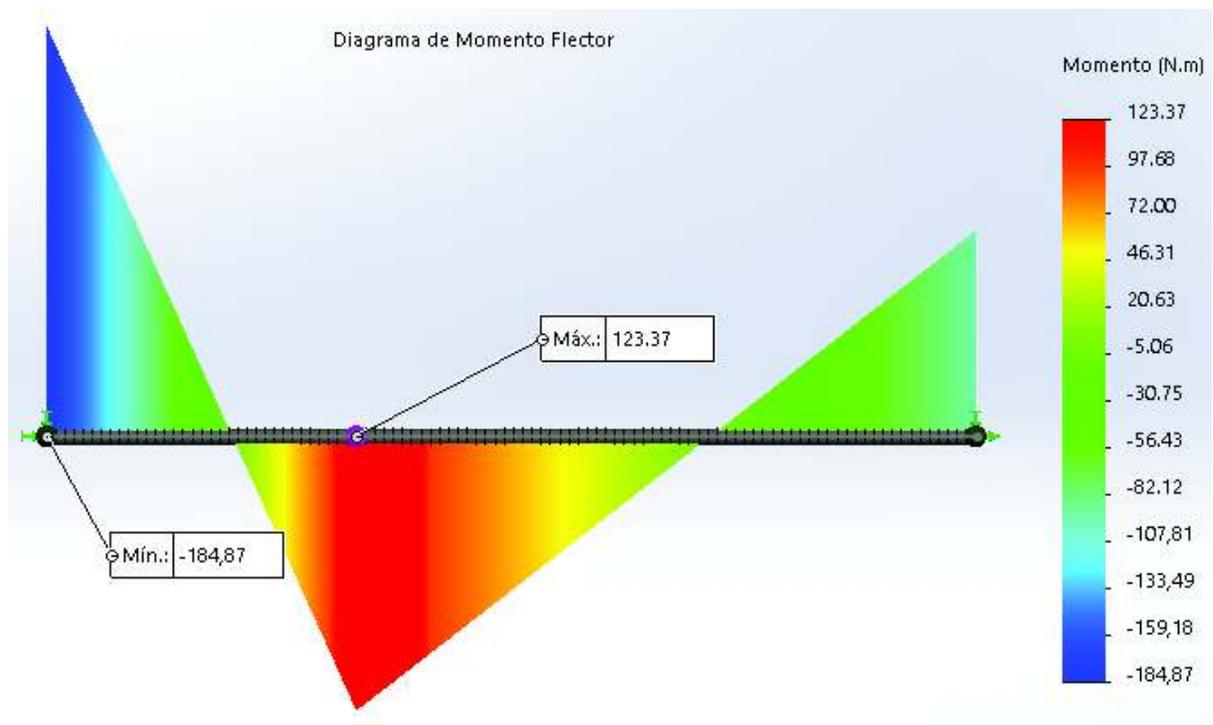


Figura 2.67. Diagrama de Momento Flector del Eje X
(Fuente: Propia)

La Figura 2.68 muestra el diagrama Esfuerzo vs. Deformación de las guías del eje X, donde se observa que el esfuerzo máximo se produce en el extremo izquierdo de las guías, mientras que en el punto de carga se tiene la máxima combinación de deformación y esfuerzo cortante.

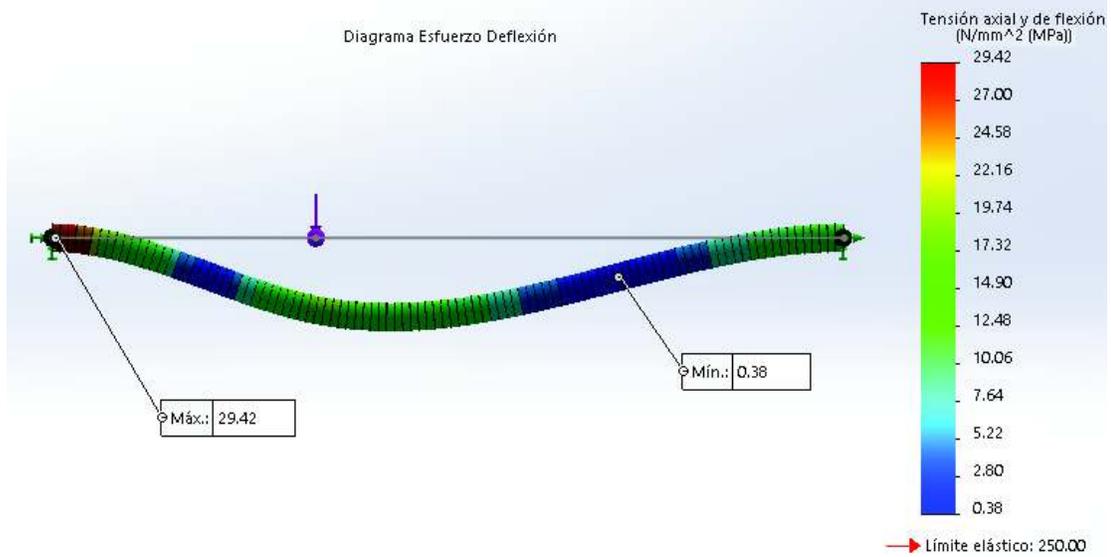


Figura 2.68. Diagrama Esfuerzo Deflexión del Eje X
(Fuente: Propia)

La simulación muestra que la deflexión máxima de las guías en el eje X se produce cuando la fuerza actúa a 1/2 de la longitud total de la guía, en el punto de carga.

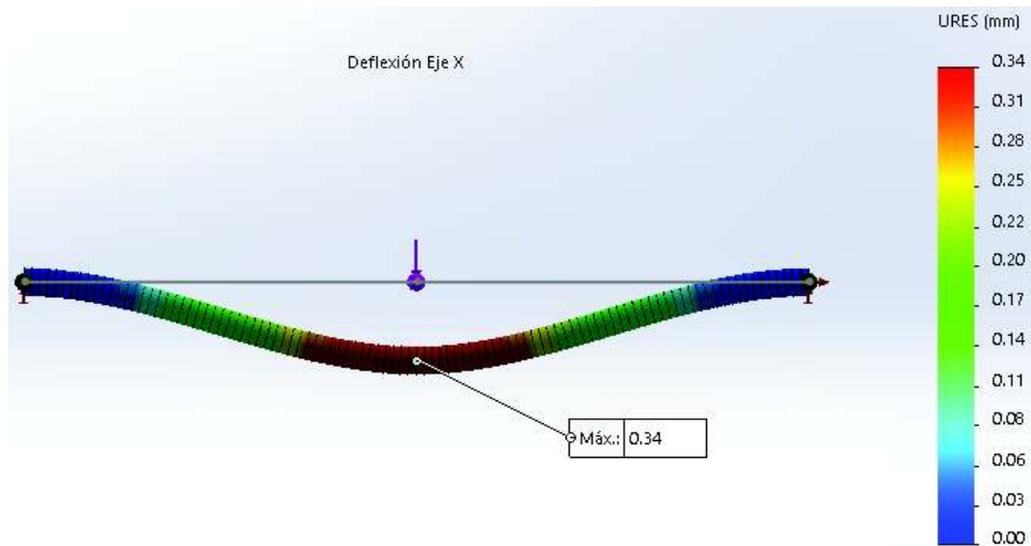


Figura 2.69. Diagrama de Deflexión del Eje X
(Fuente: Propia)

La Tabla 2.71 presenta la comparación entre resultados teóricos y simulados del eje X

Tabla 2.71. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje X

Eje X			
Parámetro	Teórico	Simulación	Error %
Momento máximo [Nm]	184,99	184,87	0,07%
Esfuerzo máximo [Mpa]	29,44	29,42	0,08%
Deflexión máxima [mm]	0,33	0,34	2,53%

(Fuente: Propia)

2.5.2.1.3. Eje Y

En la dirección Y se toma en cuenta que el eje, además de estar empotrado en ambos extremos, resiste la acción de dos fuerzas puntuales ubicadas en diferentes puntos a lo largo del eje (Figura 2.70). En la Tabla 2.72 se muestran los datos de distancia y fuerza para los cuales el esfuerzo y la deformación son máximos. Por último, los resultados globales se incluyen en la Tabla 2.73.

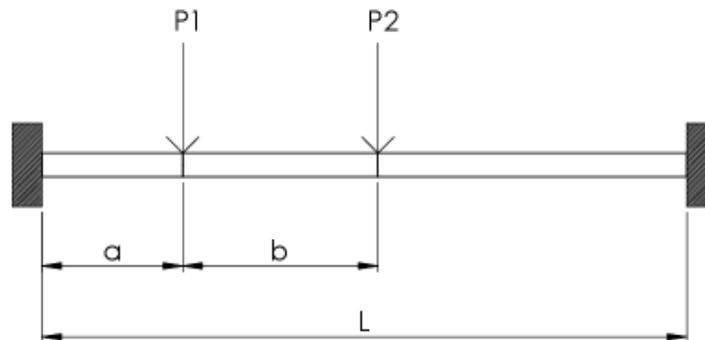


Figura 2.70. DCL eje guía del Eje Y
(Fuente: Propia)

Tabla 2.72. Datos eje guía del Eje Y

	Carga		Distancias		
	P1 [N]	P2 [N]	a [mm]	b [mm]	L [mm]
Esfuerzo máx.	403,29	403,29	238	330	1090
Deflexión máx.			370	330	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.73. Resultados de ejes guías en el Eje Y.

Diámetro d [mm]	Limite a fatiga Se [Mpa]	Esfuerzo máx [Mpa]	F. seguridad n	Deflexión máx [mm]
25	115,018	72,500	1,586	1,107
30	112,796	42,000	2,686	0,534
35	110,951	26,400	4,203	0,288
40	109,377	17,700	6,179	0,169
50	106,796	9,100	11,736	0,069

(Fuente: Propia)

Los datos de la Tabla 2.73. se obtuvieron por medio del programa en línea “FIXED STRUCTURAL BEAM DEFLECTION AND STRESS CALCULATOR FOR MULTIPLE LOADS AND MOMENTS” debido a la complejidad de la disposición de las fuerzas. [62]

En la Figura 2.71 y la Figura 2.72 se observa respectivamente el diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector de las guías del eje Y. Se logra apreciar que el momento máximo se produce en el extremo izquierdo de las guías y el segundo momento más grande se produce a 568[mm] del extremo izquierdo).

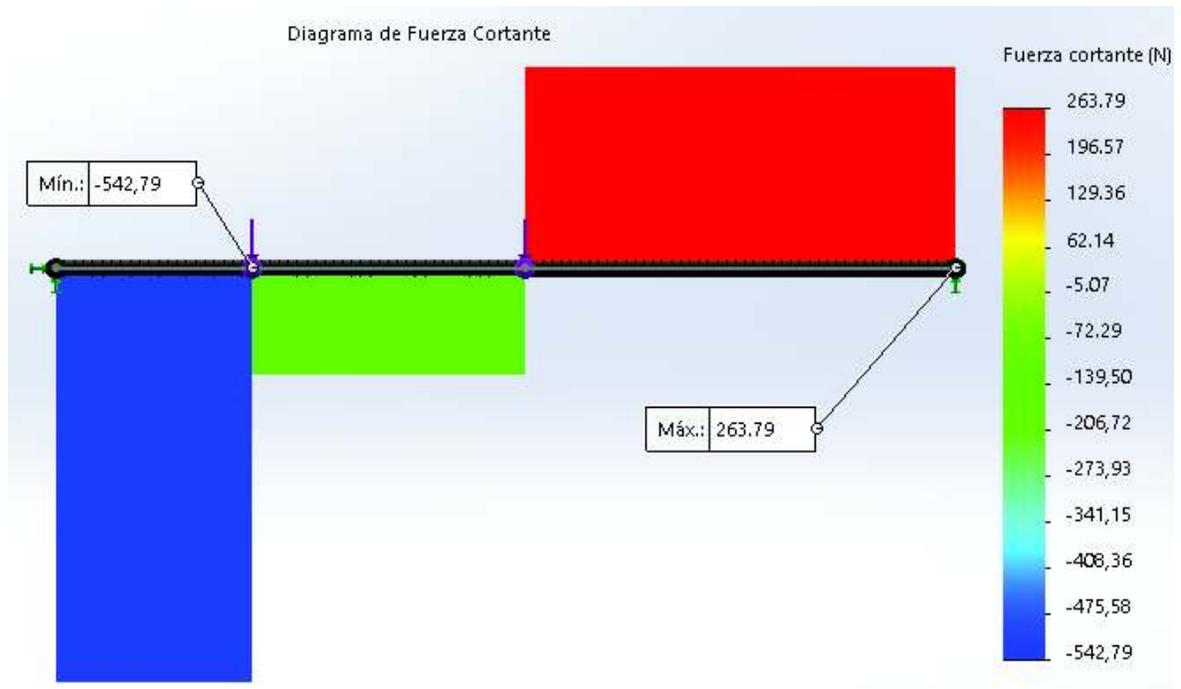


Figura 2.71. Diagrama de Fuerza Cortante del Eje Y
(Fuente: Propia)

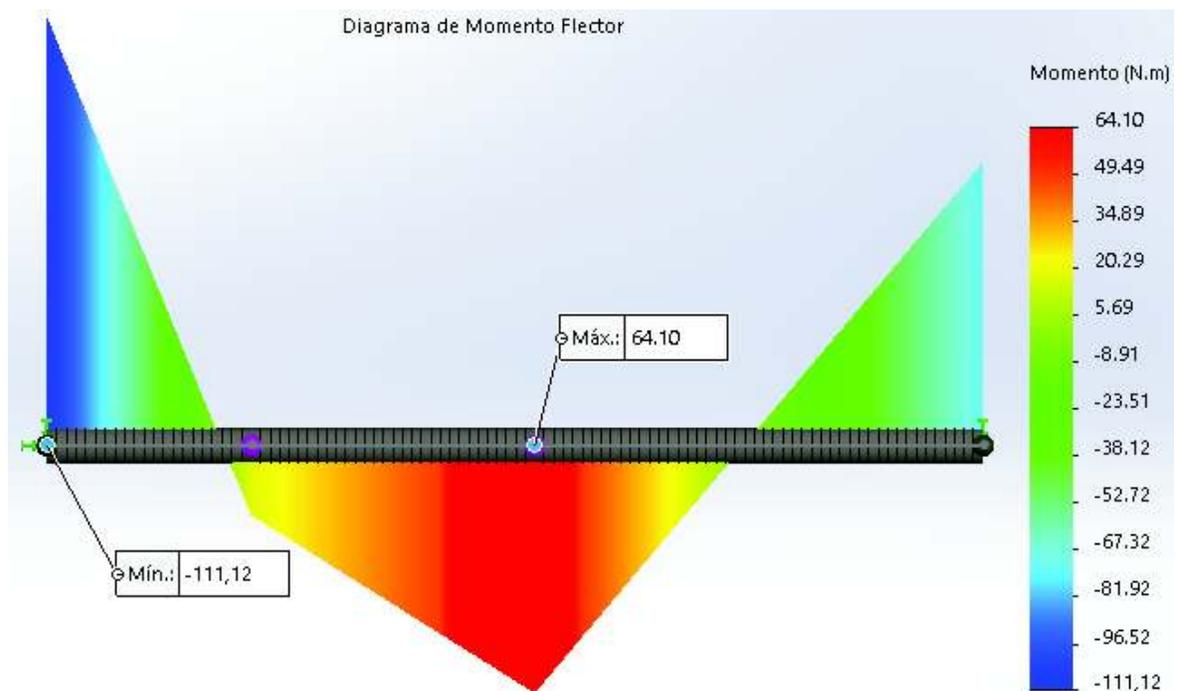


Figura 2.72. Diagrama de Momento Flector del Eje Y
(Fuente: Propia)

Mediante la simulación se puede apreciar también que el esfuerzo máximo en las guías del eje Y (Figura 2.73) se produce en el extremo izquierdo de las guías, mientras que la combinación máxima de esfuerzo-deformación se da en el segundo punto de carga (a 568[mm] del extremo izquierdo de la guía).

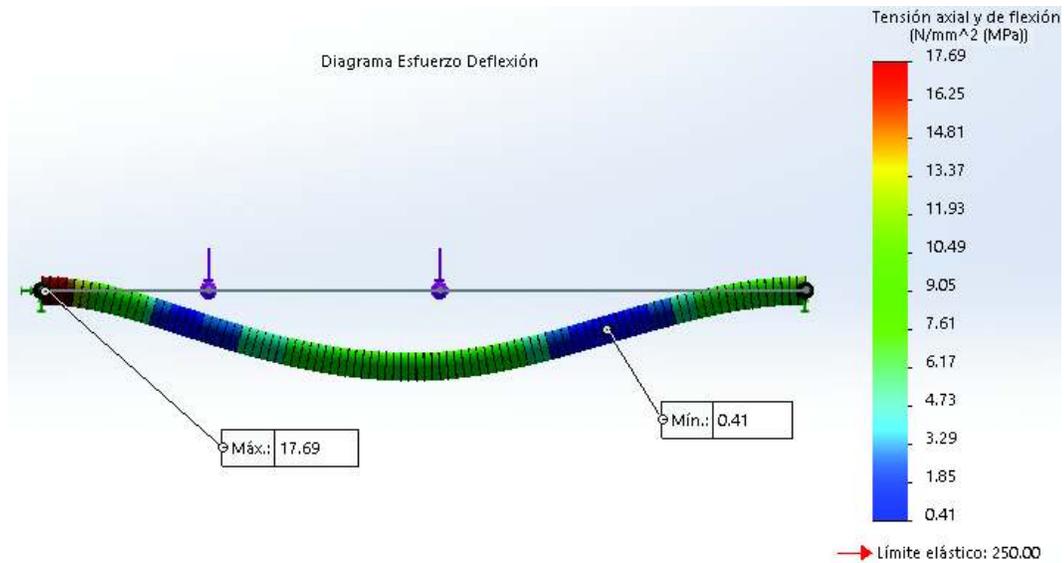


Figura 2.73. Diagrama Esfuerzo Deflexión del Eje Y
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.74 se aprecia que la deflexión máxima en las guías del eje Y se da cuando las cargas son equidistantes del centro de las guías, con lo que la deflexión máxima se produce en el centro de las guías.

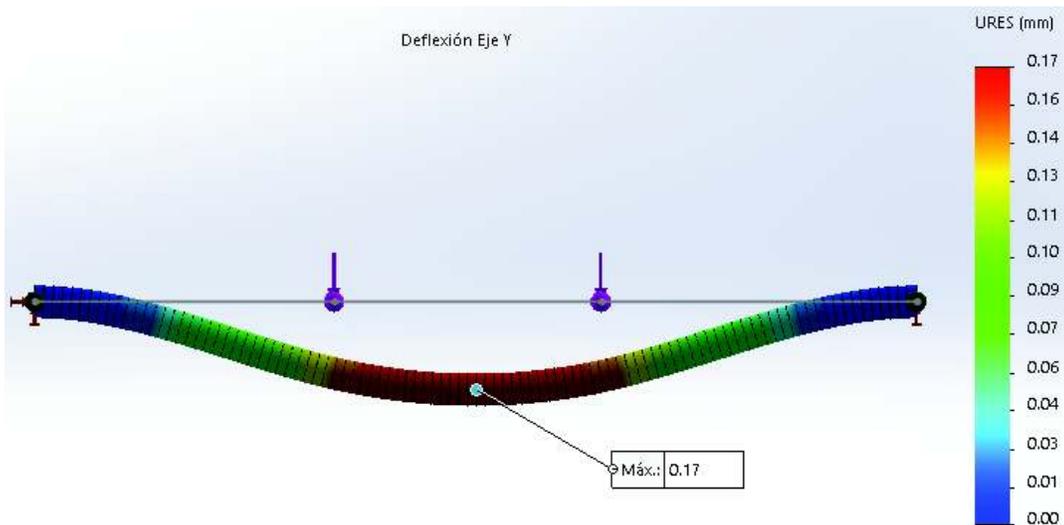


Figura 2.74. Diagrama de Deflexión del Eje Y
(Fuente: Propia)

La Tabla 2.74 muestra la comparación entre resultados teóricos y simulados del eje Y

Tabla 2.74. Comparación entre resultados teóricos y simulados del eje Y

Eje Y			
Parámetro	Teórico	Simulación	Error %
Momento máximo [Nm]	111,20	111,12	0,07%
Esfuerzo máximo [Mpa]	17,70	17,69	0,06%
Deflexión máxima [mm]	0,17	0,17	0,59%

(Fuente: Propia)

2.5.2.1.3.1. Resultados – Dimensiones de ejes guías

En base a los resultados de las simulaciones, las dimensiones óptimas para los ejes guías se incluyen en la Tabla 2.75. Los parámetros que deben cumplir los ejes guías son el factor de seguridad mayor a 1,25 y la deflexión menor 0,43 [mm].

Tabla 2.75. Ejes guías seleccionados para cada eje de la máquina.

Eje	Diámetro	Longitud	F. de seguridad	Deflexión	N. de soportes
	[mm]			[mm]	
X	40	1132	3,71	0,332	2
Y	40	1090	6,18	0,169	2
Z	25	570	1,25	0,421	2

(Fuente: Propia)

2.5.2.2. Rodamientos de bolas para eje X e Y.

Los rodamientos seleccionados deben poseer un diámetro interno igual al diámetro de los pernos que sirven de soporte. Estos rodamientos soportan cargas dinámicas. La capacidad de carga dinámica se calcula mediante la Ecuación (2.70) [63] y el ejemplo de cálculo será realizado para el sistema de guía en el eje X.

$$C = P * \left(\frac{L_{10h} * 60 * n}{1000000} \right)^{1/p} \quad (2.70)$$

Donde:

L_{10h} : Duración nominal en horas de servicio = 8000 [h] (Valor dependiente del tipo de máquina. Véase ANEXO XIV).

p: Exponente de duración = 3 (para rodamientos de bolas).

P: Carga dinámica equivalente sobre el rodamiento = 730,37 [N]

n: Velocidad de giro angular.

Para el caso de estudio la velocidad de giro a la cual son sometidos los rodamientos es variable. Al igual que con la fuerza se calculará una velocidad media de giro. De acuerdo a SKF la velocidad media puede calcularse con la Ecuación (2.71.).

$$n_m = \frac{n_{\min} + 2n_{\max}}{3} \quad (2.71.)$$

Donde:

n_m : Velocidad media de giro[rpm]

$n_{m\acute{a}x}$: Velocidad máxima de giro = 3000 [rpm]

$n_{m\acute{a}x}$: Velocidad mínima de giro = 0 [rpm]

Al reemplazar los datos en la ecuación (2.71.) se tiene:

$$n_m = 2000 \text{ [rpm]}$$

Reemplazando todos los valores en la Ecuación (2.70) se obtiene:

$$C = 7761,29 \text{ [N]}$$

En el modelo CAD presentado anteriormente (Figura 2.44), se usó un diámetro interno de 12mm para rodamientos rígidos de dos y una hilera de bolas. El radio externo de rodamiento depende de la capacidad de carga admisible, siendo los rodamientos de dos hileras aquellos que pueden soportar más carga. Los rodamientos que cumple con los requerimientos de capacidad de carga admisible se identifican en la Tabla 2.76.

Tabla 2.76. Evaluación de rodamientos usados en guía de movimiento.

Eje X (Rodamientos rígidos de dos hileras de bolas)					
Diámetro interno (d) [mm]	Diámetro externo (D) [mm]	Carga dinámica (P) [N]	Capacidad de carga (C) [N]	Capacidad admisible de catálogo [N]	Cumple
12	30	730,37	7761,69	7280	No
	32	730,37	7761,69	10600	Si
Eje Y (Rodamientos rígidos de una hileras de bolas)					
Diámetro interno (d) [mm]	Diámetro externo (D) [mm]	Carga dinámica (P) [N]	Capacidad de carga (C) [N]	Capacidad admisible de catálogo [N]	Cumple
12	21	196,90	2092,38	1740	No
	24	196,90	2092,38	2910	Si

(Fuente: Propia)

Para la adquisición de los rodamientos se optó por la marca SKF debido a que cuenta con varios distribuidores en el país. De acuerdo al catálogo correspondiente los rodamientos seleccionados tienen la siguiente denominación.

Tabla 2.77. Rodamientos SKF seleccionados.

Eje	Modelo	Cantidad
X	SKF 6201 – 2Z	8
Y	SKF 4201 ATN9	16

(Fuente: [63])

2.5.2.3. Rodamientos lineales para el eje Z

Para la selección de los rodamientos lineales es necesario calcular la carga dinámica que actúa sobre el rodamiento y compararla con la carga admisible que el rodamiento soporta. El cálculo de esta carga dinámica sigue un procedimiento similar al realizado anteriormente para los rodamientos de bolas, empleándose la Ecuación(2.72.). Los resultados del cálculo de tiene en la Tabla 2.78.

$$C = F_m * \left(\frac{L_{10} * v * S * 60}{1000000} \right)^{1/3} \quad (2.72.)$$

Donde:

L10: Duración nominal en horas de servicio= 100000

S: Carrera del rodamiento lineal=570 cm

v: Frecuencia de ciclo por minuto (1 ciclo=2 carreras). Considerando una velocidad de desplazamiento máxima de 12m/min y una carrera de 570cm, se puede tener 21ciclos en un minuto= 21 [1/min].

Tabla 2.78. Evaluación de rodamientos lineales utilizados en eje Z.

Eje X (Rodamientos rígidos de dos hileras de bolas)				
Diámetro interno (d) [mm]	Carga dinámica (P) [N]	Capacidad de carga (C) [N]	Capacidad admisible de catálogo [N]	Cumple
25	1448,1	6019,31	7830	Si

(Fuente: Propia)

Los rodamientos lineales tendrían la siguiente denominación de acuerdo al catálogo de BOSCH.

Tabla 2.79. Rodamientos lineales BOSCH.

Eje	Modelo	Cantidad
Z	R1085 612 20	4

(Fuente: [64])

2.5.3. Módulo 4

2.5.3.1. Evaluación de Husillo de bolas

Para el husillo de bolas recirculantes se consideró aspectos que podrían influir negativamente en su vida útil y funcionamiento, como son cargas que generan pandeo,

cargas axiales que provocan fallos mecánicos, velocidades que causan resonancia. Como parámetros de evaluación, se controla la velocidad admisible de rotación de las bolas recirculantes (velocidad DN), la deflexión del husillo y los requerimientos de paso. Este análisis se realiza para los husillos disponibles en el catálogo de THK (Tabla 2.80).

Tabla 2.80. Evaluación de parámetros para husillo de bolas

Eje Z								
Valores referenciales calculados			Carga Axial Máxima: 160,59 [N]		Velocidad máxima de rotación: 3000 [rpm]		Precisión: ± 0,5mm	
N°	Diámetro [mm]	Paso [mm]	Carga de pando [N]	Carga de tracción y compresión [N]	Velocidad peligrosa del husillo [rpm]	Velocidad admisible DN [rpm]	Deflexión [mm]	Cumple
1	14	4	3896,20	15341	3868,34	6944,44	0,0061	Si
Eje X								
Valores referenciales calculados			Carga Axial Máxima: 902,97 [N]		Velocidad máxima de rotación: 3000 [rpm]		Precisión: ± 0,5mm	
N°	Diámetro [mm]	Paso [mm]	Carga de pando [N]	Carga de tracción y compresión [N]	Velocidad peligrosa del husillo [rpm]	Velocidad admisible DN [rpm]	Deflexión [mm]	Cumple
1	14	4	1749,01	15341,00	1736,50	6944,44	0,047	No
2	14	5	1573,52	14551,04	1691,20	6896,55	0,049	No
3	16	5	3321,51	21141,00	2038,50	5970,15	0,036	No
4	20	5	8752,13	34317,44	2597,20	4878,05	0,024	No
5	25	5	24289,13	57169,44	3352,20	3921,57	0,016	Si
Eje Y								
Valores referenciales calculados			Carga Axial Máxima: 874,05 [N]		Velocidad máxima de rotación: 3000 [rpm]		Precisión: ± 0,5mm	
N°	Diámetro [mm]	Paso [mm]	Carga de pando [N]	Carga de tracción y compresión [N]	Velocidad peligrosa del husillo [rpm]	Velocidad admisible DN [rpm]	Deflexión [mm]	Cumple
1	14	4	1784,52	15341	1771,76	6944,44	0,045	No
2	14	5	1605,47	14551,04	1725,54	6896,55	0,047	No
3	16	5	3388,95	21141	2079,89	5970,15	0,034	No
4	20	5	8929,83	34317,44	2649,93	4878,05	0,023	No
5	25	5	24782,29	57169,44	3420,26	3921,57	0,016	Si

(Fuente: Propia)

Los husillos que satisfacen los requerimientos de diseño según el catálogo de THK se tabulan en la Tabla 2.81:

Tabla 2.81. Modelos seleccionados de husillos de bolas

Eje	Diámetro	Paso	Modelo
Z	14	4	BTK 1404V-3,6
X	25	5	BTK 2505V-2,6
Y	25	5	BTK 2505V-2,6

(Fuente: [55])

2.5.3.2. Servomotores

Para la selección del servomotor se optó por la marca OMRON. Los requerimientos de diseño para cada eje se incluyen en la Tabla 2.82:

Tabla 2.82. Evaluación de parámetros para servomotores

Torque a vencer [Nm]	Inercia total [kg m ²]	Inercia estimada de servomotor [kg m ²]	Torque estimado de servomotor [Nm]	Inercia de servomotor preselección [kg m ²]	Torque de preselección [Nm]	Torque máximo [Nm]	Torque Efectivo [Nm]	Cumple
Eje Z								
0,094	2,91*10 ⁻⁵	9,69*10 ⁻⁷	0,120	2,6*10 ⁻⁶	0,159	0,138	0,093	Si
Eje X								
0,648	4,16*10 ⁻⁴	1,38*10 ⁻⁵	0,810	1,91*10 ⁻⁵	1,270	1,250	0,643	Si
Eje Y								
0,646	4,01*10 ⁻⁴	1,36*10 ⁻⁵	0,810	1,91*10 ⁻⁵	1,270	1,240	0,642	Si

(Fuente: Propia)

De acuerdo al catálogo de OMRON los servomotores seleccionados serían:

Tabla 2.83. Modelos seleccionados de servomotores

Servomotor	Inercia de servomotor [kg m ²]	Torque [Nm]	Modelo
Z	2,6*10 ⁻⁶	0.159	R88M-U05030
X	1,91*10 ⁻⁵	1.27	R88M-U40030
Y	1,91*10 ⁻⁵	1.27	R88M-U40030

(Fuente:[59])

2.6. Diseño de control automático

2.6.1. Diseño preliminar del control automático

En esta etapa se establece todos los parámetros necesarios para realizar el control automático de la máquina, además de especificar la disposición, rangos de operación y especificaciones técnicas de elementos utilizados en el control. Una vez seleccionados los elementos y especificados los parámetros se procede a realizar la simulación para observar el cómo interactúan los elementos conectados entre sí al momento de realizar la tarea programada.

El diseño del control automático se realiza en base a la definición de los mismos lineamientos de diseño utilizados en el Capítulo 2.4:

- Requerimientos limitadores
- Funciones críticas

- Parámetros críticos
- Condiciones críticas

2.6.1.1. Requerimientos limitadores

Los requerimientos limitadores (RL#) de acuerdo a las especificaciones técnicas de la máquina son:

RL1) Máxima velocidad lineal de avance de los carros de transporte: 12 [m/min].

RL2) Máxima velocidad de giro de los servomotores: 3000[Rpm].

RL3) Desplazamientos máximos: X:800 Y:600 Z:350 [mm].

RL4) Precisión de avance: 0,1[mm].

RL5) Tiempo de aceleración / desaceleración de los servomotores: 0,25[s].

2.6.1.2. Funciones críticas

Las funciones críticas (FC#) del control automático son:

FC1) Accionamiento simultáneo de los servomotores.

FC2) Regulación de velocidad de giro de los servomotores por medio de la retroalimentación de los encoders.

FC3) Detección de fines de carrera en cada eje.

FC4) Presentación de valores de registro de posición en cada eje.

FC5) Señalización de paro debido a emergencia.

FC6) Señalización visual de operación en cada eje

2.6.1.3. Parámetros críticos

Los parámetros críticos (PC#) que modifican las funciones críticas son:

PC1) Cantidad y tipo de entradas en el PLC.

PC2) Cantidad y tipo de salidas en el PLC.

PC3) Especificaciones del PLC.

PC4) Especificaciones de los servomotores.

PC5) Especificaciones de sensores (Fin de carrera y encoders).

2.6.1.4. Condiciones críticas

Las funciones críticas y los requerimientos críticos imponen ciertas condiciones críticas tanto Cualitativas (CCI#) como Cuantitativas (CCt#) sobre el diseño del control automático.

CCt1) Los elementos de control y servomotores deben tener un correcto funcionamiento a lo largo de la vida útil de la máquina.

CCt2) Las fuentes de alimentación tendrán que satisfacer requerimientos de voltaje y amperaje necesarios para accionar elementos de control y servomotores.

CCt3) Los servomotores deben proporcionar la velocidad requerida en el programa de maquinado correspondiente diferentes piezas.

CCt4) Los servomotores deben actuar de manera independiente y sincronizada de acuerdo a los requerimientos de los programas para maquinar las diferentes piezas.

CCt5) Las entradas y salidas analógicas deben estar programadas de acuerdo a los rangos de operación de las variables que manejan.

CCI1) Los servomotores deben ser accionados simultáneamente a partir de la activación de los sensores correspondientes.

CCI2) Los sensores de seguridad deben detener o apagar instantáneamente el movimiento de la máquina ante la existencia de condiciones de riesgo.

CCI3) La señalización visual debe permitir que el operador reconozca el estado de operación de la máquina en observancia de las advertencias emitidas por las señales correspondientes.

2.6.1.5. Establecimiento de las condiciones críticas

En este punto se describe la configuración del sistema de control de la máquina con una representación de la ubicación de los elementos de control en relación a los elementos funcionales (mecánicos). La representación se realiza mediante el programa PC_SIMU, el cual permite simular una aproximación de la máquina en forma gráfica, mediante el intercambio de datos de entradas y salidas con el simulador de PLC S7200.

El programa PC_SIMU posee distintos elementos de entrada y salida, que permiten la representación gráfica de algunos mecanismos. En la Figura 2.75 se puede ver la interfaz gráfica del programa.

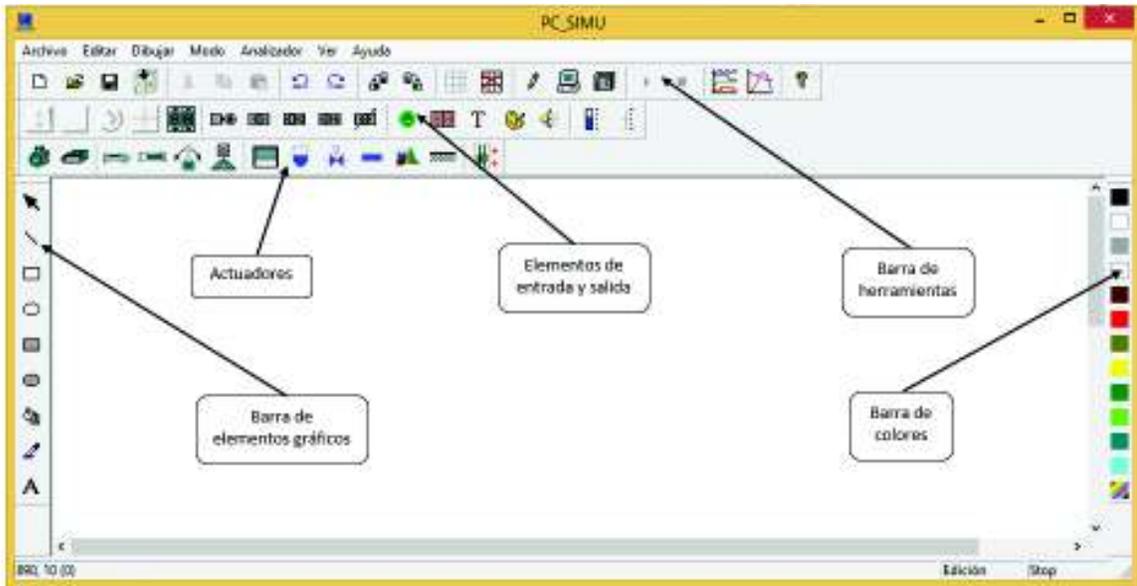


Figura 2.75. Elementos del PC_SIMU
(Fuente: Propia)

Para definir las entradas y salidas del PLC es necesario realizar una representación del sistema de control de la máquina. Debido a las limitaciones del programa es necesario crear más de un archivo con los siguientes esquemas:

- Control principal: Se presenta la simulación del funcionamiento principal de la máquina (Figura 2.76).
- Panel de control: Se visualiza la configuración de ajuste de parámetros de funcionamiento del sistema (Figura 2.77).
- Señalización y seguridad: Se muestran las diferentes señalizaciones y advertencias de seguridad de la máquina (Figura 2.78).

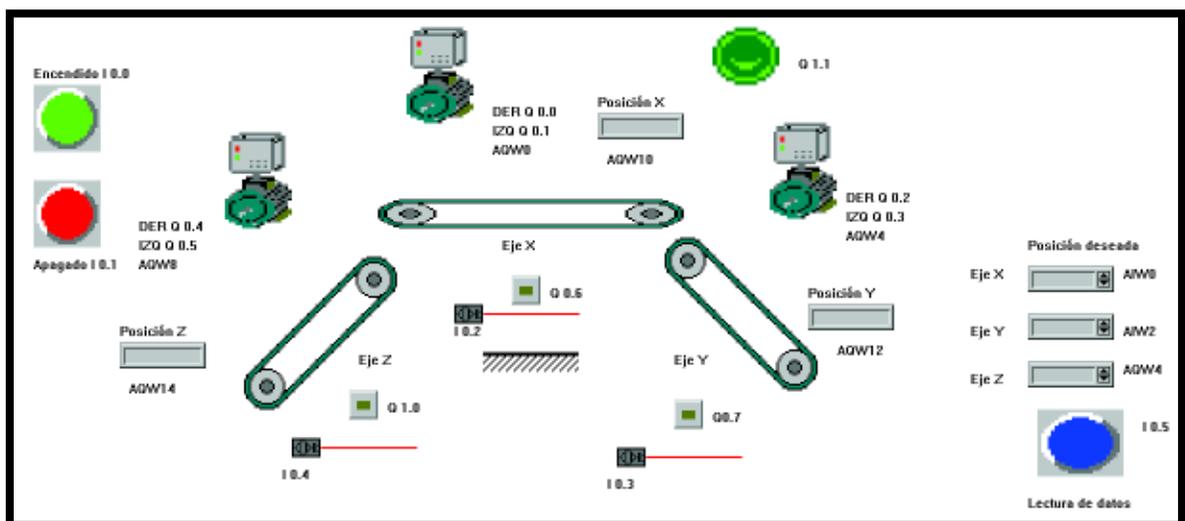


Figura 2.76. Diagrama del Control Principal
(Fuente: Propia)

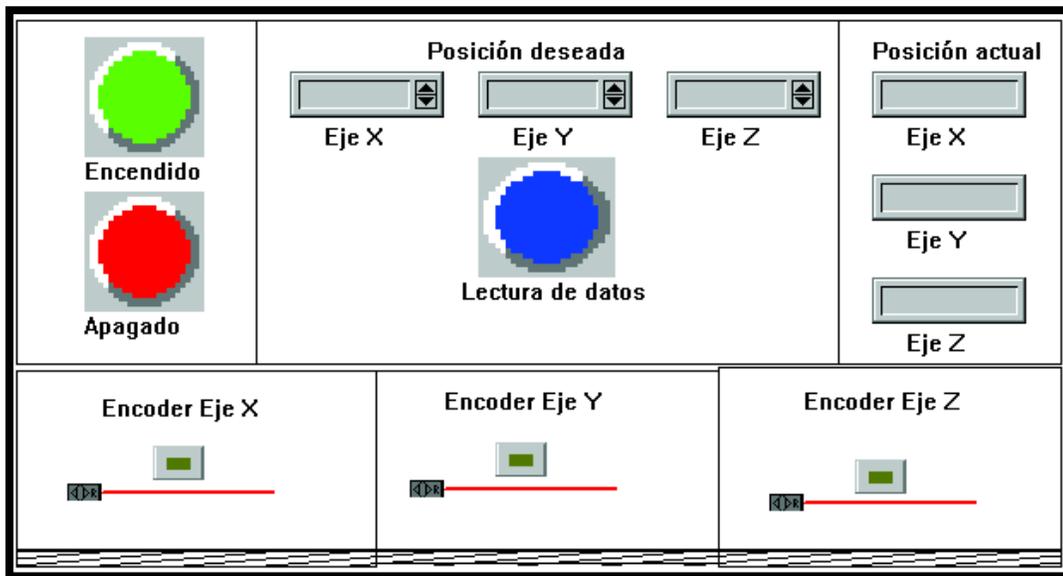


Figura 2.77. Diagrama del Panel de Control
(Fuente: Propia)



Figura 2.78. Diagrama de Señalización y Seguridad
(Fuente: Propia)

Para la simulación en la pantalla de señalización se accionara los fines de carrera con ayuda de boques que voten cajas cada vez que la posición llegue a uno de sus puntos límites. Se lo realizó de esta forma debido a las limitaciones que presenta el programa de simulación.

2.6.1.5.1. Entradas del PLC

Las entradas del PLC provienen de sensores y captadores que componen el sistema de control. Las señales que puede recibir el PLC son digitales y analógicas, en éste caso las entradas digitales se identifican en la Tabla 2.84. y las analógicas en la Tabla 2.85.

Tabla 2.84. Entradas digitales

N°	Dirección	Función	Tipo	Descripción
1	I0.0	Encendido	Pulsador	Encendido Principal
2	I0.1	Apagado	Pulsador	Apagado Principal
3	I0.2	Detectar velocidad en X	Barrera Réflex	Obtener información de velocidad y posición en X
4	I0.3	Detectar velocidad en Y	Barrera Réflex	Obtener información de velocidad y posición en Y
5	I0.4	Detectar velocidad en Z	Barrera Réflex	Obtener información de velocidad y posición en Z
6	I0.5	Lectura de datos	Pulsador	Permite realizar la lectura de datos de posición deseada.
7	I0.6	Fin de carrera eje X	Pulsador	Detiene movimiento en X para Evitar el impacto
8	I0.7	Fin de carrera eje Y	Pulsador	Detiene movimiento en Y para Evitar el impacto
9	I1.0	Fin de carrera eje Z	Pulsador	Detiene movimiento en Z para Evitar el impacto

(Fuente: Propia)

Tabla 2.85. Entradas Analógicas

N°	Dirección	Función	Tipo	Descripción
1	AIW0	Colocar posición deseada en X	Potenciómetro numérico	Permite colocar el valor deseado en X (Display)
2	AIW2	Colocar posición deseada en Y	Potenciómetro numérico	Permite colocar el valor deseado en Y (Display)
3	AIW4	Colocar posición deseada en Z	Potenciómetro numérico	Permite colocar el valor deseado en Z (Display)

(Fuente: Propia)

2.6.1.5.2. Salidas del PLC

Una vez procesada las señales de entrada, el PLC manda una respuesta a los actuadores correspondientes. También existen salidas digitales y analógicas, las cuales se muestran en la Tabla 2.87 y Tabla 2.86 respectivamente.

Tabla 2.86. Salidas analógicas

N°	Dirección	Función	Tipo	Descripción
1	AQW0	Controlar vel. motor eje X	Servocontrolador	El Driver emite señal de control de velocidad del servomotor X
2	AQW4	Controlar vel. motor eje Y	Servocontrolador	El Driver emite señal de control de velocidad del servomotor Y
3	AQW8	Controlar vel. motor eje Z	Servocontrolador	El Driver emite señal de control de velocidad del servomotor Z
4	AQW10	Mostrar posición X	LCD	Se muestra posición actual X
5	AQW12	Mostrar posición Y	LCD	Se muestra posición actual Y
6	AQW14	Mostrar posición Z	LCD	Se muestra posición actual Z

(Fuente: Propia)

Tabla 2.87. Salidas digitales

N°	Dirección	Función	Tipo	Descripción
1	Q0.0	Giro derecho motor Eje X	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje X hacia la derecha.
2	Q0.1	Giro izquierdo motor Eje X	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje X hacia la izquierda.
3	Q0.2	Giro derecho motor Eje Y	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje Y hacia la derecha.
4	Q0.3	Giro izquierdo motor Eje Y	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje Y hacia la izquierda.
5	Q0.4	Giro derecho motor Eje Z	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje Z hacia la derecha.
6	Q0.5	Giro izquierdo motor Eje Z	Servocontrolador	Rotar el servomotor del eje Z hacia la izquierda.
7	Q0.6	Detectar velocidad en X	Encoder	Obtener información de velocidad y posición en X
8	Q0.7	Detectar velocidad en Y	Encoder	Obtener información de velocidad y posición en Y
9	Q1.0	Detectar velocidad en Z	Encoder	Obtener información de velocidad y posición en Z

(Fuente: Propia)

2.6.1.5.3. Especificaciones del PLC

El controlador lógico programable seleccionado será de la gamma del Siemens S7-200, debido a la gran cantidad de CPUs y módulos de expansión existentes en el mercado. A continuación se enlista las ventajas de ocupar esta gamma de PLCs.

- Posee una amplia gama de módulos de ampliación.
- El tiempo de respuesta es rápido.
- Posee una alta capacidad de memoria.
- Posee una extensa funcionalidad en todos los tipos de CPUs disponibles en esta Gamma.
- Es compatible con el programa de simulación PC_SIMU.

Es necesario establecer el número de entradas y salidas necesarias para poder seleccionar el número de módulos extra necesarios para realizar el control.

Tabla 2.88. Número de entradas y salidas necesarias.

Tipo	Número
Entrada digital	9
Entrada analógica	3
Salida digital	9
Salida analógica	6

(Fuente: Propia)

Debido al número de entradas y salidas, el PLC a ser utilizado es el Siemens S7 200 CPU: 224 XP como se ve en la Figura 2.79.



Figura 2.79. PLC Siemens S7 200 CPU: 224XP
(Fuente: [65])

- CPU: 224XP DC/Relé.
- Alimentación: 24 VDC.
- Entradas digitales: 14 x 24 VDC.
- Salidas digitales: 10 x 24 VDC.
- Puertos COM: 2 puertos RS-485.
- Entradas analógicas: 2.
- Salidas analógicas: 1.
- Memoria de programa: 12288 bytes en runtime y 16384 bytes sin runtime.
- Memoria de datos: 10240 bytes.
- Máx Módulos de ampliación permisibles: 7 módulos

En función al número de entradas y salidas también es necesario incluir los siguientes módulos de expansión.

- Dos Módulos EM 232: 2 salidas analógicas cada uno.
- Un Módulo EM 235: 4 entradas analógicas y 1 salida analógica.

2.6.1.5.4. Especificaciones de elementos de entrada

A continuación se presenta las especificaciones de los elementos de entrada, así como una pequeña descripción y funcionamiento de cada elemento a ser utilizado.

2.6.1.5.4.1. Entradas Digitales:

- 1) Pulsadores

Para el control se va a utilizar 3 pulsadores como se puede ver en la Tabla 2.89:

Tabla 2.89. Pulsadores requeridos en el control.

Pulsador	Tipo	Observaciones
Master ON	Normalmente abierto	Energiza la máquina y las memorias del PLC que dicta la programación correspondiente.
Master OFF	Normalmente cerrado	Desactiva todos los actuadores de la máquina y reinicia las memorias del PLC.
Lectura de Datos	Normalmente abierto	Permite la lectura de datos de posición deseada y activa los servomotores.

(Fuente: Propia)

Un pulsador es un elemento que permite (Normalmente abierto) o interrumpe (Normalmente cerrado) el paso de corriente al ser accionado. Los pulsadores vuelven a su estado normal una vez que el accionamiento se interrumpe. Constan de un botón unido a un contacto metálico, que al ser presionado establece contacto con dos terminales eléctricos, o se separa de los mismos. Una vez que la presión sobre el botón cesa, un resorte retorna el botón a su estado inicial (Figura 2.80). Los pulsadores son de dos tipos, normalmente abiertos (NA) y normalmente cerrados (NC). El primer tipo permite el paso de corriente al ser accionado, mientras que el segundo tipo interrumpe el paso de corriente al ser presionado. [66]

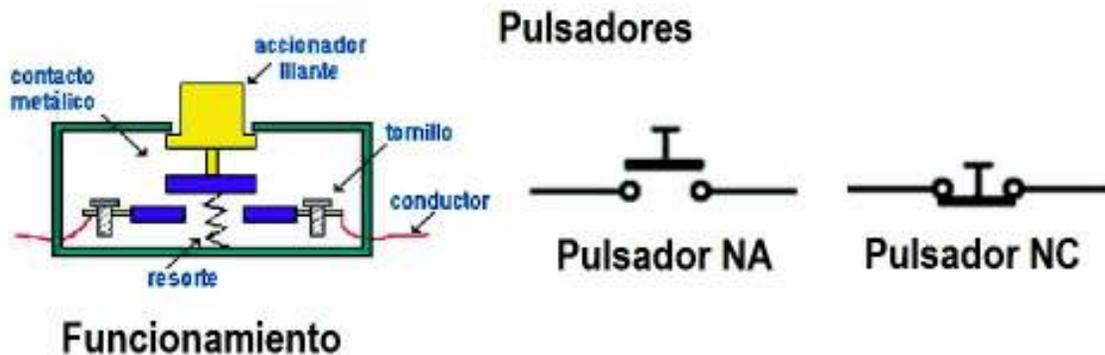


Figura 2.80. Funcionamiento de Pulsadores
(Fuente: [66])

Los pulsadores seleccionados poseen las siguientes especificaciones (Figura 2.81) [67]:

- Pulsador con carcasa metálica SIEMENS SIRIUS 3SB35 y 3SB36
- Diámetro de instalación: 22 mm
- Voltaje: 24 VDC
- Corriente: 10 A
- Master On: color verde, NA
- Master Off: color rojo, NC
- Lectura de datos: color azul, NA



Figura 2.81. Pulsador SIRIUS 3SB36 amarillo
(Fuente: [67])

2) Barrera réflex

A pesar de que en la Figura 2.76 y en la Figura 2.77, correspondientes a los diagramas de control principal y de señalización, se muestran sensores tipo barrera réflex, éstos se incluyen como referencia de los encoders utilizados para el control de posición y velocidad de los servomotores. A continuación se incluye una explicación sobre el funcionamiento de las barreras réflex.

La barrera réflex es un sensor fotoeléctrico que permite la detección de objetos mediante un haz de luz (visible o invisible). El sensor está compuesto por un emisor y un receptor. Este tipo de sensores compara la luz emitida por el emisor con la luz captada por el receptor, y si algún objeto distorsiona la cantidad de luz que debe ser recibida por el receptor, el sensor se activa. En la Figura 2.82 se observa el funcionamiento de estos sensores. [68]

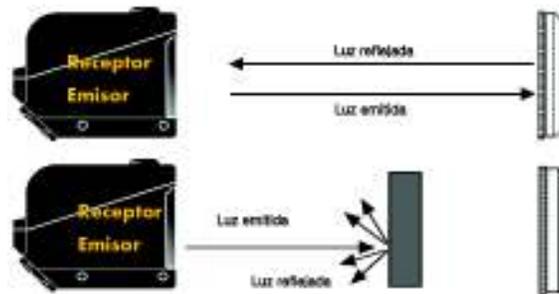


Figura 2.82. Sensores Fotoeléctricos de Barrera réflex
(Fuente:[68])

3) Fin de Carrera

También llamados sensores de contacto, son dispositivos electromecánicos que se sitúan al final del recorrido de un elemento móvil, con el objetivo de enviar señales que modifiquen el estado de un circuito. El funcionamiento es sencillo, al pasar el elemento móvil acciona una palanca o pistón del interruptor de posición lo cual lo hace abrir o cerrar un contacto eléctrico dentro del interruptor; la señal que se genera en este periodo se lo utiliza iniciar una secuencia operativa sobre los elementos de control, usualmente el paro total de la máquina.

En la Figura 2.83 se puede ver el funcionamiento de un sensor de fin de Carrera del tipo Transductor. [69]

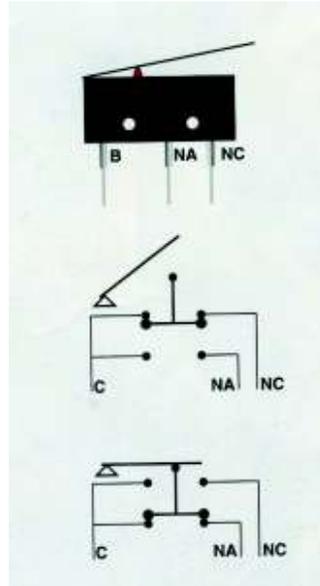


Figura 2.83. Funcionamiento de Fin de Carrera
(Fuente: [69])

En este caso los fines de carrera se emplearán para evitar la colisión de los carros con la estructura, de modo que se los colocará en cada extremo de los ejes para que al activarse la máquina detenga su movimiento instantáneamente (Similar al pulsador de paro).

Los pulsadores seleccionados son de marca Schneider con las siguientes especificaciones (Figura 2.84)[70]:

- Interruptores de posición Osiswitch® Clásico XCK L
- Dimensiones: 52x72x30 mm
- Voltaje: 24 VDC o 220 VAC
- Corriente: 10 A
- Sirve para movimiento: rectilíneo, angular y angular multidireccional.
- 2 contactos de ruptura brusca positiva: 1 NA y 1 NC.
- Grado de protección: IP66, IK06



Figura 2.84. Interruptores de posición Osiswitch® Clásico XCK L
(Fuente: [70])

2.6.1.5.4.2. Entradas Analógicas:

1) Encoder

Un Encoder es un elemento electromecánico que transforma el movimiento en una señal eléctrica, tipo pulsos, que se utiliza para determinar la posición, velocidad o dirección en diferentes aplicaciones. Estas pueden ser magnéticas, ópticas o de resistencias.[71]

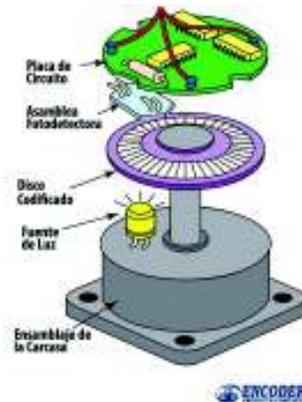


Figura 2.85. Partes de un encoder fotoreceptor incremental.
(Fuente: [71])

Un encoder rotativo del tipo óptico consta de un eje rotatorio, unido a un disco que posee partes transparentes y opacas, y un emisor de luz infrarroja (Figura 2.85). El emisor de luz infrarroja emite una luz que es interceptada por el disco con partes transparentes y opacas, que a su vez gira con el movimiento del eje rotatorio. Dichos pulsos son captados por un sensor fotoreceptor que transforma dicha información en señales eléctricas.

Existen dos tipos de encoders rotativos:

- Incremental: No provee una referencia de la posición absoluta en la que se encuentra.
- Absoluto: Provee una referencia de la posición absoluta en la que se encuentra mediante un bus de datos paralelo.

El encoder considerado para el proyecto se encuentra integrado con el motor, y tiene las siguientes especificaciones (Tabla 2.90):

Tabla 2.90. Especificaciones de encoder de servomotores R88M-UXXX30H

Encoder absoluto óptico	
Numero de pulsos de salida	Fases A, B: 1024 pulsos/ revolución. Fase Z: 1 pulso/revolución
Voltaje de la fuente de alimentación	5 VDC±5%
Amperaje de la fuente de alimentación	DC 170 [mA]
Velocidad de rotación máxima	4500 [rpm]
Frecuencia de respuesta máxima	153,6 kHz

(Fuente: [59])

2) Display numérico con salida analógica

Este tipo de display permite la configuración de datos numéricos para su posterior lectura como datos analógicos (Entradas analógicas del PLC) por el PLC. En el presente diseño se proyecta utilizar tres displays que permitan configurar las coordenadas de posición deseada en cada uno de los ejes.

Los displays seleccionados son los siguientes (Figura 2.86) [72]:

- Denominación: Loop-powered LCD display 5531A
- Número de líneas: 1
- Numero de caracteres: 4
- Tamaño de caracteres: 5 mm
- Tensión: 12 VDC o 24 VDC



Figura 2.86. Loop-powered LCD display 5531A
(Fuente: [72])

2.6.1.5.5. Especificaciones de elementos de salida

2.6.1.5.5.1. Salidas Digitales

1) Led (Alarmas y Señales)

Las luces led representaran tanto señales o estados de las operaciones como alarmas necesarias en operaciones críticas de la máquina que representen un riesgo potencial en la misma. La secuencia de luces led que se utilizará será el siguiente:

- Led Verde: La máquina se encuentra en operación realizando algún movimiento ingresado.
- Led Rojo: La máquina se encuentra parada, no realiza ningún movimiento.
- Led Amarillo: Algún eje de la máquina está próximo a una colisión con su soporte. Esto sucede en el momento que se trabaja en los puntos extremos de posiciones permitidas en la máquina.

Las luces Led seleccionadas presentan las siguientes características (Figura 2.87) [67]:

- Denominación: Luces indicadoras con lente lisa SIEMENS- SIRIUS 3SB3244.
- Colores: Verde, Rojo, Amarillo.
- Voltaje: 24 VDC, 110 VAC o 230 VAC
- Corriente termica:10 A
- Con luz Led integrada



Figura 2.87. Luces indicadoras con lente lisa SIEMENS- SIRIUS 3SB3244
(Fuente:[67])

2) Relés

Un relé es un dispositivo electromecánico que permite la unión entre una línea eléctrica de alta o baja potencia y un circuito de baja potencia, es decir los relés son dispositivos que operan con baja potencia para controlar circuitos de alta potencia.

En este proyecto los relés se utilizan como seguridad para la conexión del PLC y los servomotores, para evitar que el PLC y los servomotores se dañen por voltajes altos.

Los relés seleccionados son los siguientes (Figura 2.88) [67]:

- Denominación: Relé de seguridad SIEMENS SIRIUS 3TK2825-1BB40
- Número de Pines: 24
- Número de contactos conmutados (NA/NC): 4
- Tensión: 24 VDC / 24 VAC / 115 VAC



Figura 2.88. Relé de seguridad SIEMENS SIRIUS 3TK2825-1BB40
(Fuente: [67])

3) Servomotores (Con Encoder incluido)

Un servomotor es un motor eléctrico que puede ser controlado en posición, velocidad y/o par motor; dicha característica permite corregir errores entre valores de consigna y reales. Este tipo de motores son idóneos para este tipo de aplicación donde se requiere velocidad, potencia y precisión; ya que son capaces de generar 3 a 4 veces su par nominal de forma transitoria para oponerse a esfuerzos inesperados. (Véase Figura 2.89)



Figura 2.89. Servomotores rotativos Omron.

(Fuente: [73])

Para el sistema de posicionamiento y desplazamiento se seleccionaron los servomotores con las características descritas en la Tabla 2.91. Estos servomotores tienen incorporado un encoder con las especificaciones de la Tabla 2.90

Tabla 2.91. Motores seleccionados de la marca Omron.

Omron		
Eje a usarse	Z	X e Y
Modelo	R88M-U05030H(A)	R88M-U40030H(A)
Torque nominal [Nm]	0,159	1,27
Torque máximo momentáneo [Nm]	0,48	3,82
Velocidad de rotación nominal [rpm]	3000	3000
Corriente nominal [A(rms)]	0,6	2,6
Potencia Nominal [w]	50	400
Pulsos por revolución	200	200
Peso Aprox. [kg]	0,4	1,7

(Fuente: [59])

2.6.1.5.5.2. Salidas Analógicas

1) Driver de control del servomotor (Servodrive)

Para el control de los servomotores es necesario la adquisición de un servodrive para cada uno de ellos. Siendo el Servodrive un dispositivo que recibe las señales del sistema de control, amplifica dichas señales y las envía al servomotor para producir un movimiento proporcional a dicha señal.

Tabla 2.92. Especificaciones de servodrive R88D- UAXXH Omron

Omron		
Eje a usarse	Z	X e Y
Modelo	R88D-UA03H(A)	R88D-UA12H(A)
Fuente de alimentación	Una fase 200/230 VAC (170 a 253 V) 50/60 Hz	Una fase 200/230 VAC (170 a 253 V) 50/60 Hz
Corriente nominal de salida [A]	0,85	3,7
Máxima corriente de salida [A]	2,7	11,3
Potencia del servomotor aplicable [W]	50	400
Peso [kg]	0,9	1,2

(Fuente: [59])

Servodrive

- Fuente de alimentación: una fase 200/230 VAC (170 a 253 V) 50/60 Hz
- Corriente nominal de salida: 3,7 A
- Máxima corriente de salida: 11,3 A
- Potencia del servomotor aplicable: 400 W
- Peso: 1,2 Kg

2) Pantalla LCD

Una pantalla LCD permite visualizar de manera numérica la señal analógica enviada por el PLC, después de haber cumplido con los requerimientos del programa. Para la máquina que se está diseñando, las tres pantallas LCD se las utilizara para mostrar en tiempo real las coordenadas de posición en cada eje.

La LCD seleccionada presenta las siguientes especificaciones (Figura 2.90) [74]:

- Denominación: Display de Texto SIEMENS SIMATIC HMI TD17
- Configuración: Tabla 2.93

Tabla 2.93. Configuraciones posibles del Display TD17

Configuración	1	2
Líneas	4	8
Caracteres	20 c/u	40 c/u
Tamaño caracteres	11[mm]	6 [mm]

(Fuente: [74])

- Tipo: LCD retro iluminado
- Voltaje: 24 VDC
- Corriente: 340 mA normal, 1,6 A máx
- Dimensiones: 240 x 98 x 51 mm

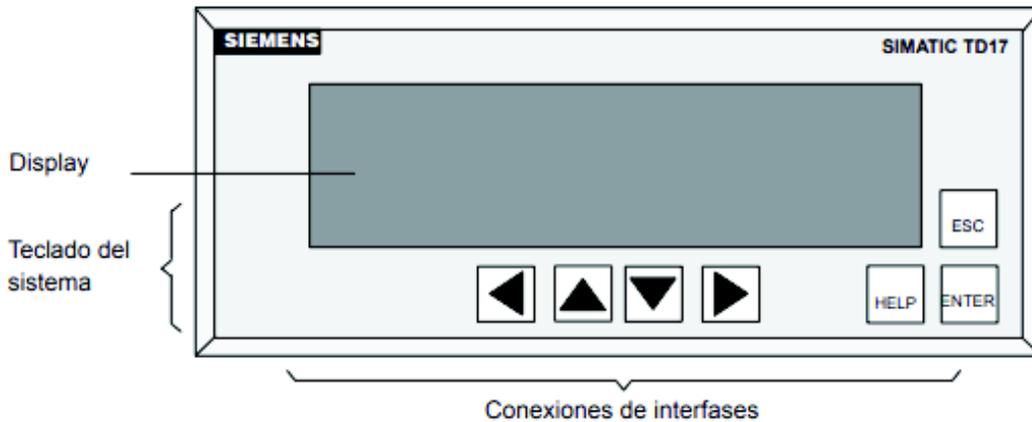


Figura 2.90. Display SIEMENS SIMATIC TD17

(Fuente: [74])

2.6.2. Diseño definitivo del control automático

En esta sección se fija la secuencia de operaciones que debe realizar el PLC, de forma lógica y sistemática.

2.6.2.1. Secuencia de las operaciones de control

Se observa la secuencia de las operaciones de control, los cuales son una descripción del control automático de la máquina.

Tabla 2.94. Secuencia Principal de las operaciones de control

Secuencia	Operación de control	Elementos accionados		Estado
		Entrada	Salida	
1	Encendido Principal	Pulsador Master ON	Servocontroladores	Energizar circuito servomotores
			Servomotores	
			Led rojo	Luz roja encendida
2	Lectura de datos	Pulsador Lectura de datos	Servocontroladores	Detectar dirección de giro
			Servomotores	
		Display	Led rojo	Luz roja apagada
			Led verde	Luz verde encendida
3	Movimiento y posicionamiento en los ejes	Encoders	Servocontrolador	Mover servomotores y posicionar en coordenadas indicadas
			Servomotores	
			Display entradas analógicas	Presentación de valores de posición
4	Control de velocidad	Encoders	Servocontrolador	Velocidad de trabajo definida
			Servomotores	
5	Retroalimentación del ciclo de trabajo de los pasos 2 al 4			

(Fuente: Propia)

Tabla 2.95. Secuencia Secundaria de las operaciones de control.

Secuencia	Operación de control	Elementos accionados		Estado
		Entrada	Salida	
1.1	Condición 1: Si se supera las posiciones máximas	Fin de carrera	Servocontroladores	Detener los servomotores
			Servomotores	
			Led Amarillo	Luz amarilla encendida
			Led Verde	Luz verde Apagada
1.2	Reinicio total del ciclo de trabajo			
2.1	Condición 2: Si es necesario detener la máquina/ Master Off	Pulsador Master OFF	Servocontroladores en funcionamiento	Paro total de la máquina
			Servomotores en funcionamiento	
			Led verde, rojo, amarillo	Luces apagadas
2.2	Reinicio total del ciclo de trabajo			

(Fuente: Propia)

2.6.2.2. Programación de PLC

La programación del PLC se realizó en el Programa STEP 7 – MicroWIN V4.0, el cual posee todas las herramientas necesarias para programar la serie de PLCs Siemens S7-200. La interfaz del programa es amigable con el usuario y se encuentra compuesta por los siguientes elementos (Figura 2.91) [65]:

- Barras de herramientas: contienen botones de método abreviado para los comandos de menú de uso frecuente
- Barra de navegación: comprende iconos que permiten acceder a las diversas funciones de programación.
- Árbol de operaciones: Se puede visualizar todos los objetos del proyecto y las operaciones para crear el programa de control.
- Editor de programas: contiene el programa y una tabla de variables locales donde se pueden asignar nombres simbólicos a las variables locales temporales.

STEP 7 - MicroWIN ofrece tres editores para crear programas:

- Esquema de contactos (KOP): El editor KOP visualiza el programa gráficamente, de forma similar a un esquema de circuitos.
- Lista de instrucciones (AWL): El editor AWL visualiza el programa textualmente. Permite crear programas de control introduciendo la nemotécnica de las operaciones.

- Diagrama de funciones (FUP): El editor FUP visualiza el programa gráficamente, de forma similar a los circuitos de puertas lógicas. En FUP no existen contactos ni bobinas como en el editor KOP, pero sí hay operaciones equivalentes que se representan en forma de cuadros.



Figura 2.91. Interfaz de usuario STEP 7 – MicroWIN
(Fuente: [65])

El programa se lo realizara con el Editor KOP. Los programas KOP hacen que el programa emule la circulación de corriente eléctrica desde una fuente de alimentación, a través de una serie de condiciones lógicas de entrada que, a su vez, habilitan condiciones lógicas de salida.

2.6.2.2.1. Lenguaje de programación

Debido a la diversidad de lenguajes de programación La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) desarrolló el estándar IEC 1131 donde se reúne en dos grupos dichos lenguajes. Siendo lenguajes textuales y lenguajes gráficos [75]:

Lenguajes textuales

- Lista de instrucciones
- Texto estructurado

Lenguajes gráficos

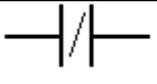
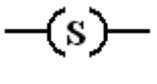
- Diagrama ladder
- Diagrama de bloques de funciones

Debido a su facilidad de uso el lenguaje a usarse para la programación del autómata programable (PLC) es el lenguaje ladder o también conocido como diagrama de contactos o escalera. Este nombre se debe a su representación, donde se tiene dos líneas verticales (alimentación) y una serie de líneas horizontales que se asemejan a escalones, donde se desarrolla la lógica de programación. El lenguaje ladder tiene las características de [76]:

- Colocar a la izquierda del diagrama las instrucciones de entrada
- Colocar a la derecha del diagrama las instrucciones de salida
- La lectura del programa se realiza de arriba abajo y de izquierda a derecha.

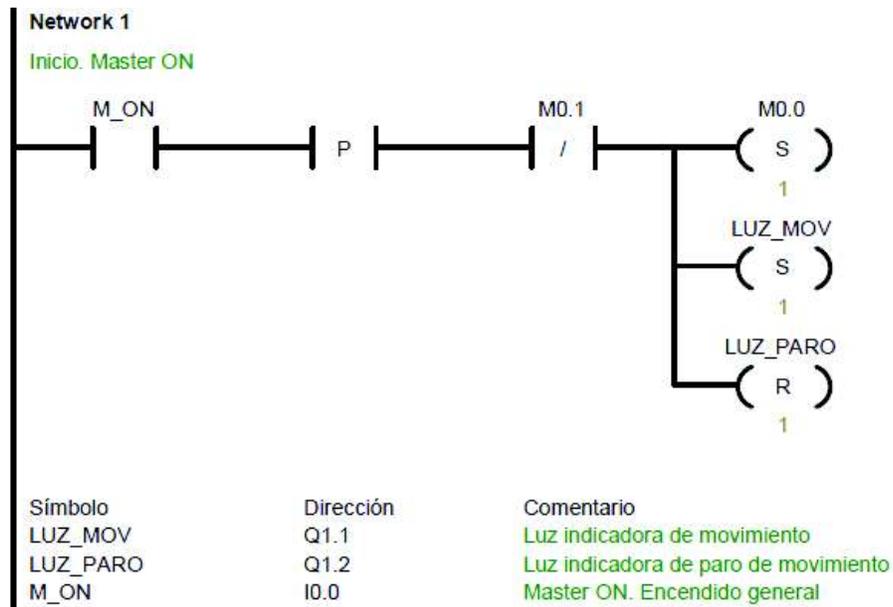
Los principales elementos a usarse en la programación se pueden observar en la Tabla 2.96:

Tabla 2.96. Elementos de programación ladder.

Símbolo	Nombre	Descripción
	Contacto NA	Se activa cuando hay un uno lógico en el elemento que representa, esto es, una entrada (para captar información del proceso a controlar), una variable interna o un bit de sistema.
	Contacto NC	Su función es similar al contacto NA anterior, pero en este caso se activa cuando hay un cero lógico, cosa que deberá de tenerse muy en cuenta a la hora de su utilización.
	Bobina NA	Se activa cuando la combinación que hay a su entrada (izquierda) da un uno lógico. Su activación equivale a decir que tiene un uno lógico. Suele representar elementos de salida, aunque a veces puede hacer el papel de variable interna.
	Bobina NC	Se activa cuando la combinación que hay a su entrada (izquierda) da un cero lógico. Su activación equivale a decir que tiene un cero lógico. Su comportamiento es complementario al de la bobina NA.
	Bobina SET	Una vez activa (puesta a 1) no se puede desactivar (puesta a 0) si no es por su correspondiente bobina en RESET.
	Bobina SET	Permite desactivar una bobina SET previamente activada.

(Fuente: [77])

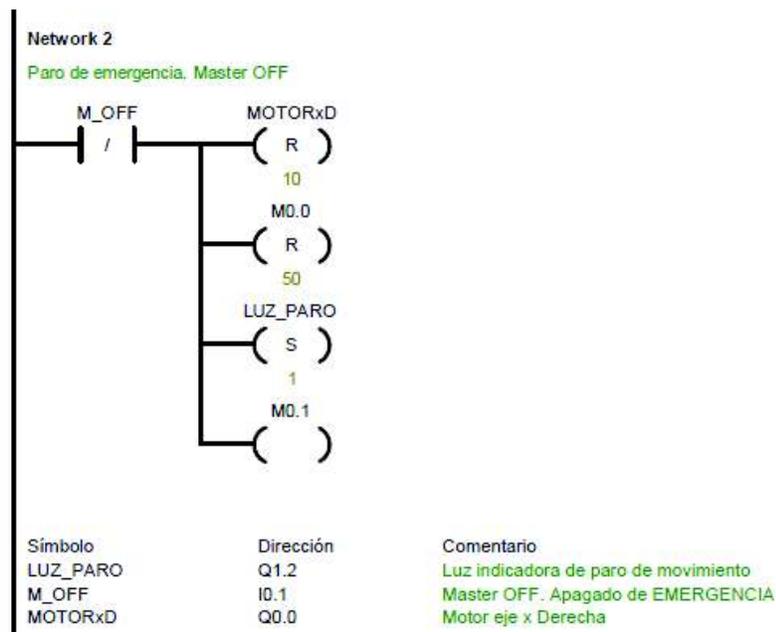
2.6.2.2.2. Comentarios del programa ladder



Segmento 1: Siempre y cuando el contacto asociado a la memoria M0.1 se encuentre cerrado, al accionar el pulsador I0.0 se procederá a:

- Activar (set) la memoria M0.0
- Activar (set) la salida Q1.1
- Resetear la salida Q1.2

El activar la memoria M0.0 con un set permitirá igualar a cero las variables todas las variables internas y poner a punto al programa para la lectura de valores.

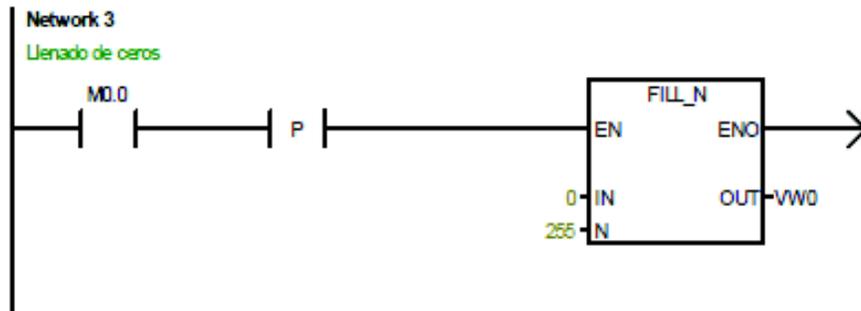


Segmento 2: Con el cambio de estado del pulsador I0.1 (Master Off):

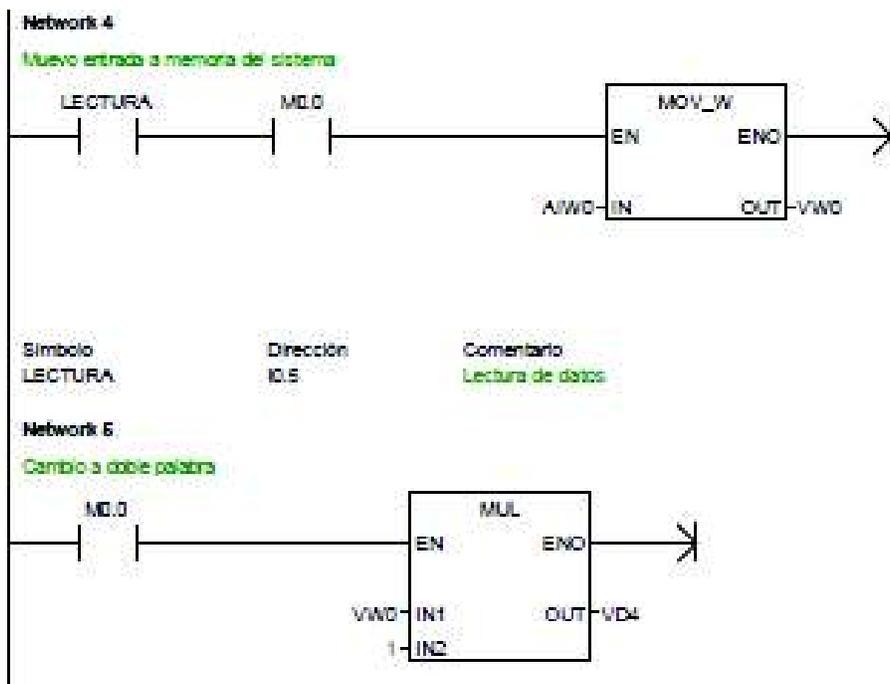
- Resetear las memorias internas M0.0 en un número mayor a las usadas en la programación.
- Resetear las bobinas en un número mayor a las usadas en la programación.

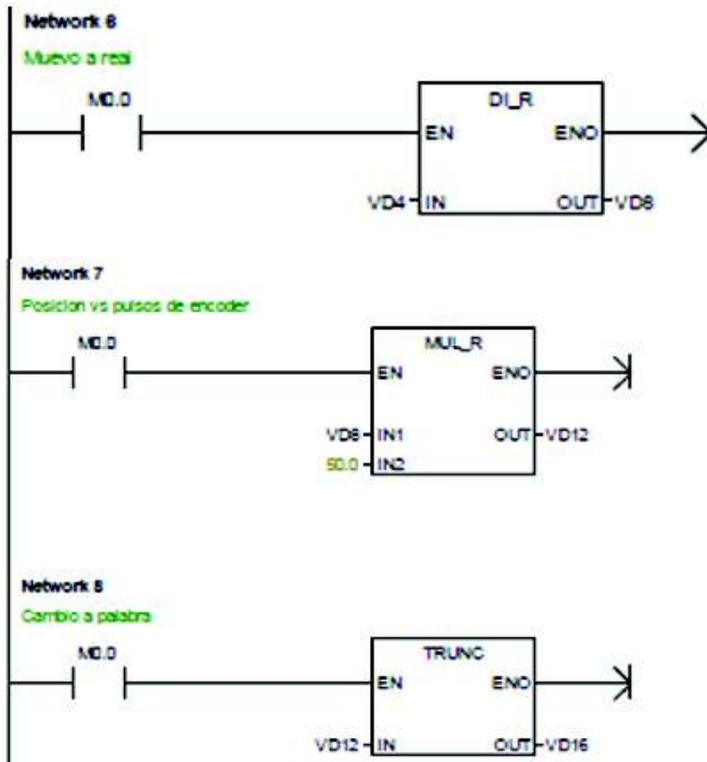
Esto detiene cualquier acción que se encuentre realizando el sistema de posicionamiento CNC.

- Activar (set) la bobina Q1.2. Señal de alerta que el pulsador de emergencia ha sido pulsado.
- Adicionalmente se activa la bobina M0.1 la cual a abrirá el segmento 1 impidiendo su funcionamiento, a no ser que el pulsador I0.1 vuelva a su estado inicial.



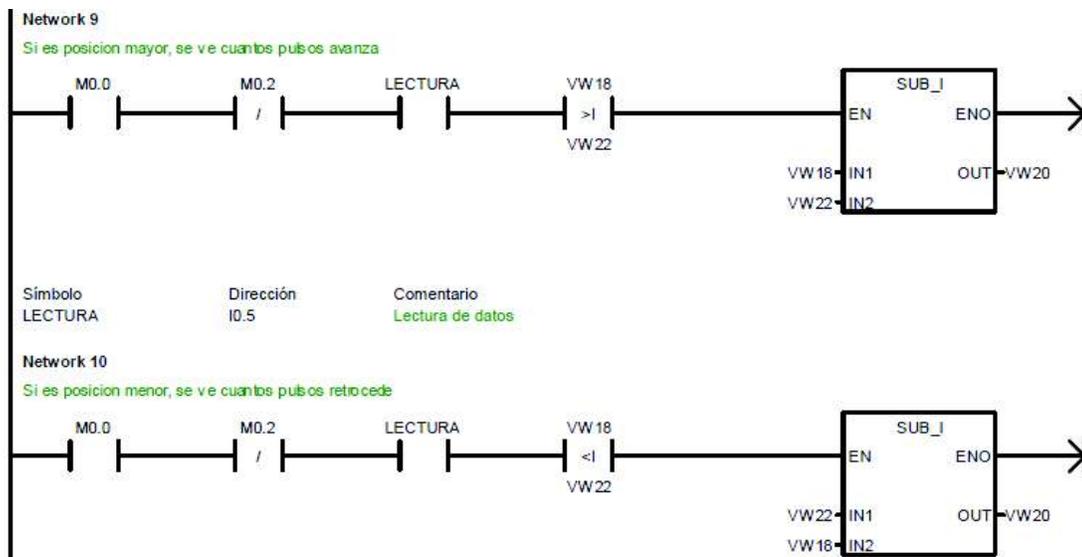
Segmento 3: Con el contacto asociado a la memoria M0.0 cerrado se procede a llenar de ceros las memorias del PLC (encerar), desde la 0 hasta la 255.



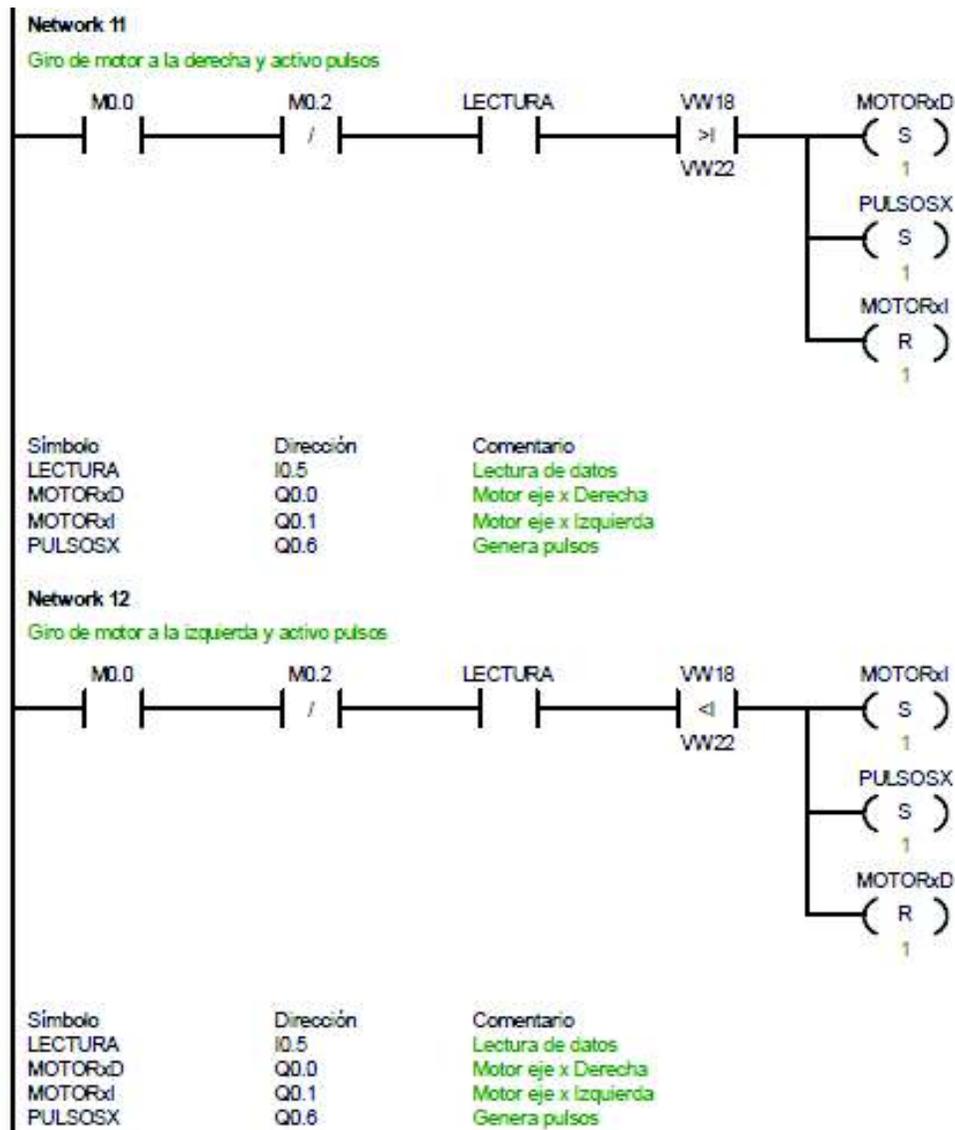


Segmento 4, 5, 6, 7, 8: Corresponden al escalamiento de la variable analógica, transformando la lectura de la posición deseada en pulsos de salida del PLC a enviarse al servomotor.

Tomando en cuenta que 200 pulsos equivalen a una vuelta del servomotor y el tornillo de potencia usado es de 4mm de paso, se considera que 50 pulsos corresponden a 1 [mm] de desplazamiento. La lectura de las coordenadas se realiza mediante la entrada analógica AIW0 y el número de pulsos a darse como valor doble entero se guardaría a partir de la memoria VD12 y como valor entero a partir de la memoria VD18.

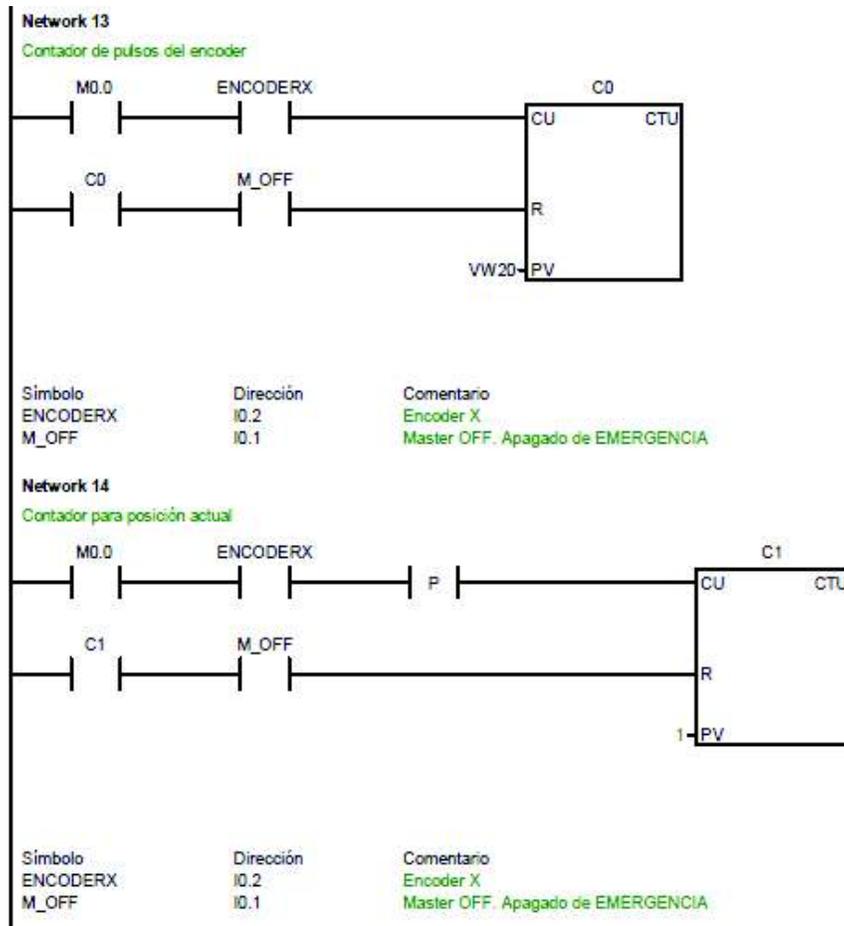


Segmento 9 y 10: Con los contactos asociados a M0.0 y M0.2 cerrados y el accionamiento del pulsador I0.5 se compara si los pulsos dados hasta la posición actual (guardados en la variable VW22) son menor o mayor que lo pulsos necesarios para la posición deseada (guardado en la variable VVW18) y en función de esto de calcula mediante una resta el número de pulsos necesarios para llegar a dicha posición.

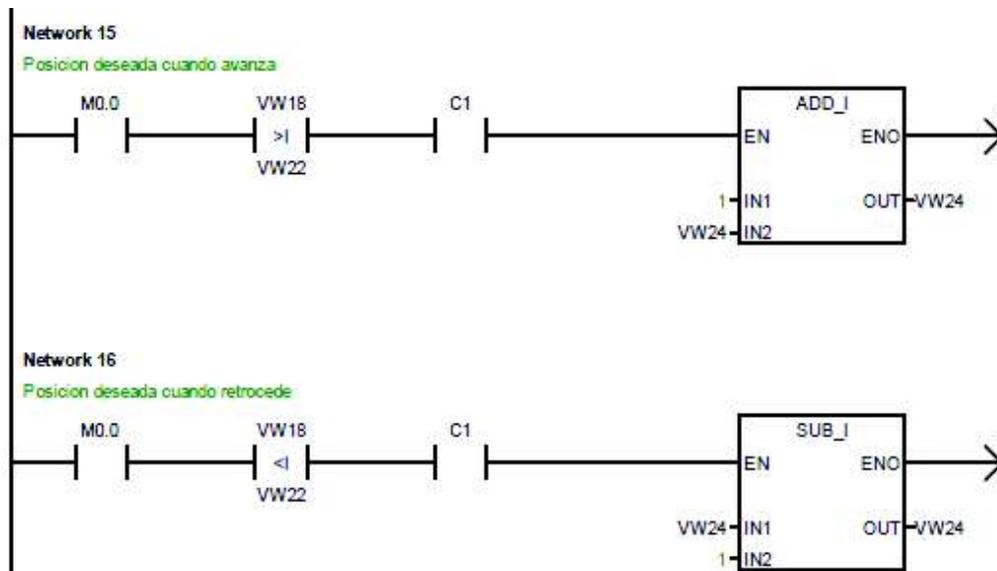


Segmento 11,12: El sentido de giro horario o anti-horario del motor depende si el movimiento es de avance o retroceso. Con los contactos asociados a M0.0 y M0.2 cerrados y el accionamiento del pulsador I0.5 se procede a:

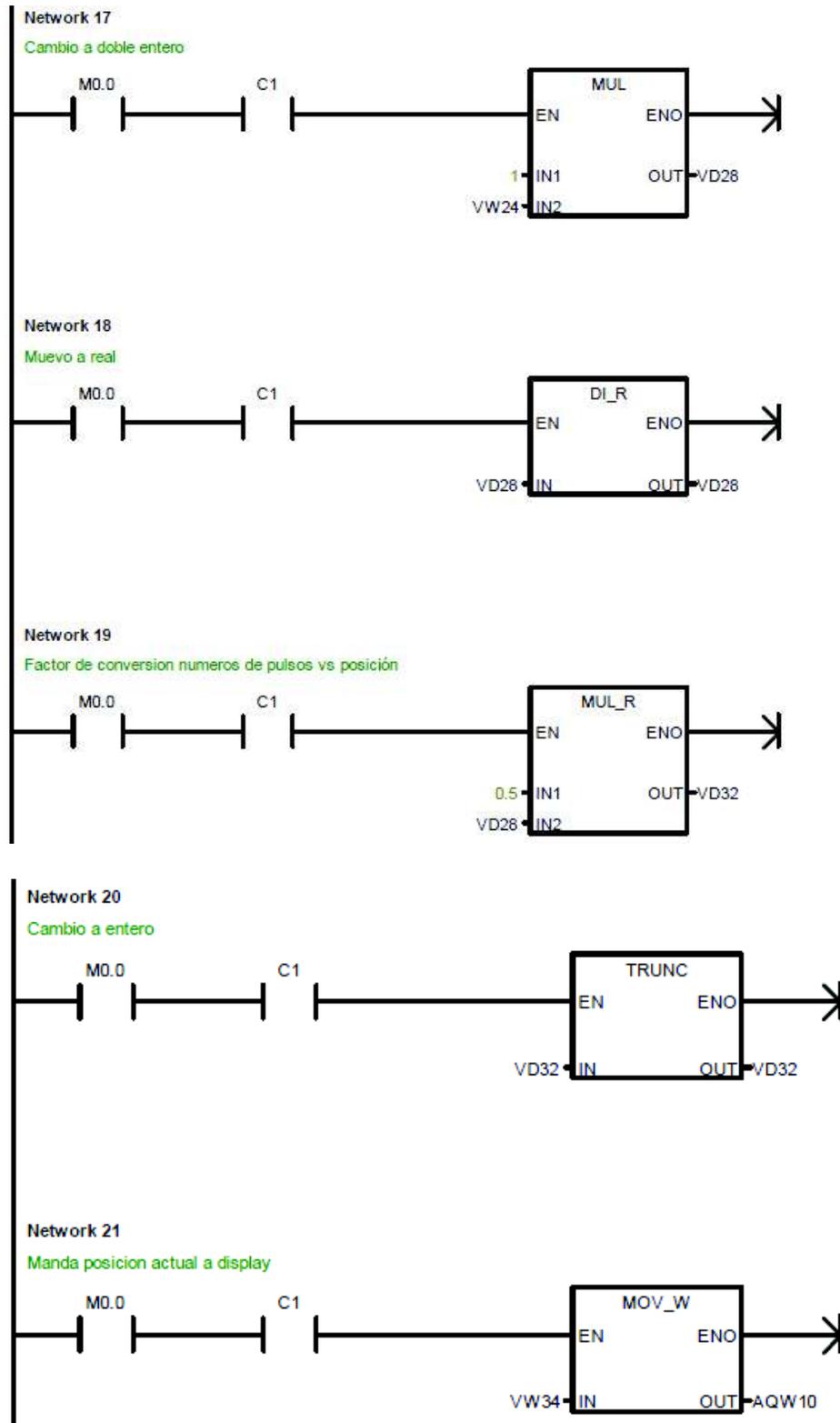
- Iniciar el movimiento de los motores en uno u otro sentido al activar Q0.0 o en su defecto Q0.1.
- Activar una salida Q0.6 que para efectos de la simulación del programa, actúa como encoder



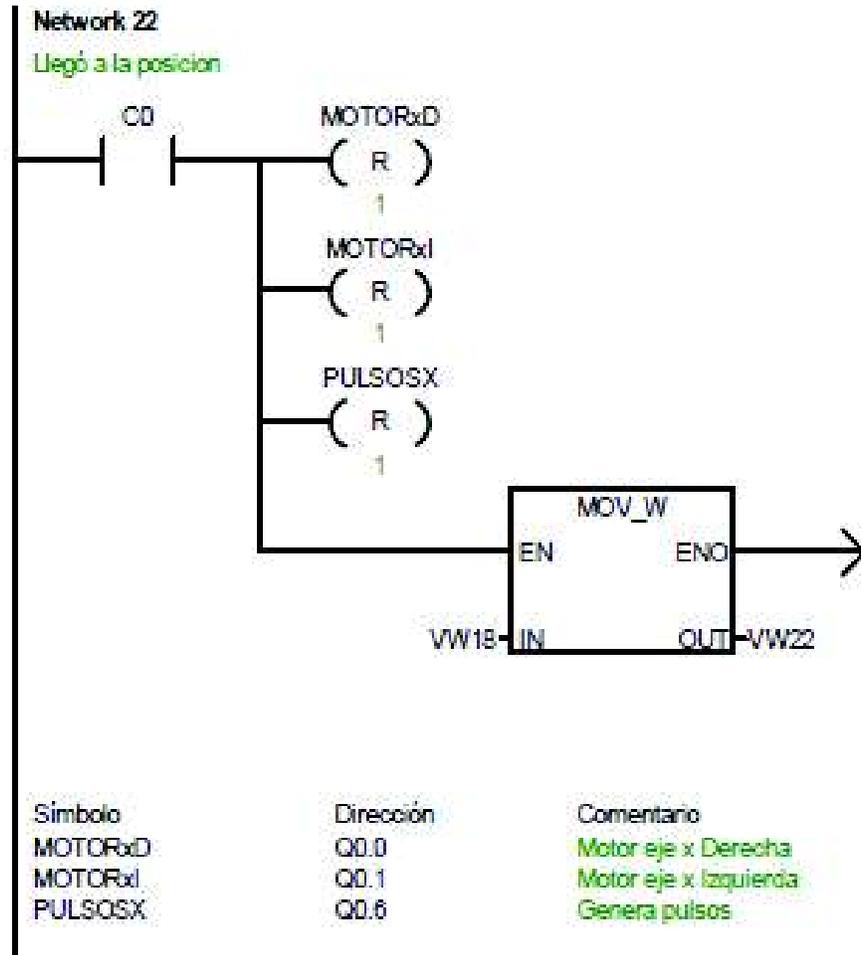
Segmento 13 y 14: Se usarán los contadores C0 y C1 para tener un registro de los pulsos realizados por el encoder donde ambos se resetearán con su propia salida o con pulsador de paro de emergencia I0.1. El contador C0 se usará para saber cuándo el carro correspondiente al eje X llegue a la posición deseada y el contador C1 se usará para conocer la posición actual; todo esto se realiza en función de los pulsos dados.



Segmento 15 y 16: Para la posición actual del carro del eje X se analiza si el movimiento de avance o retroceso, en función de esto, y con ayuda del contador C1 se resta o suma pulsos al valor de pulsos dado para llegar a la posición actual en cada instante.

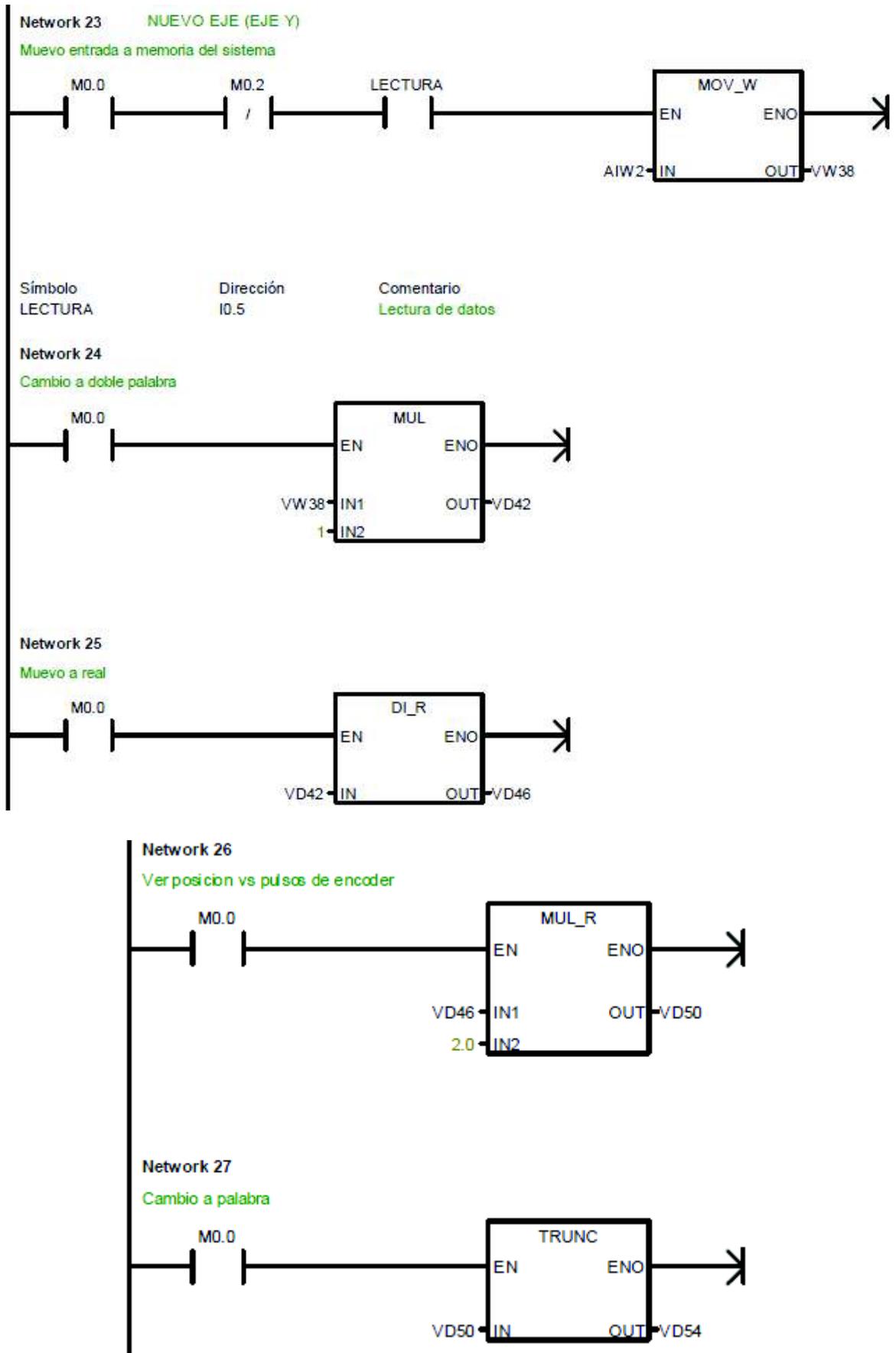


Segmento 17, 18, 19, 20,21: Se realiza el escalamiento del número de pulsos a posición actual, para posteriormente mostrarlo en un display analógico correspondiente a la salida AQW0.



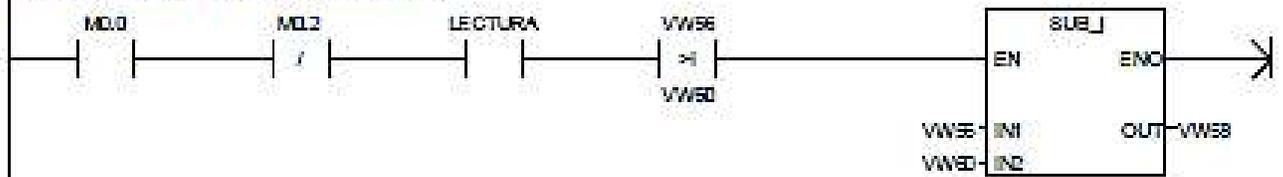
Segmento 22: Una vez que los pulsos necesarios dados para llegar a la posición deseada han sido registrados por el contador se detiene el movimiento de los motores y la posición deseada pasa a ser la posición actual (VW18 cambia a ser el dato entero VW22). Por último, se resetea la salida usada para simular un encoder (Q0.6).

Los siguientes segmentos de código hasta el segmento 60 repiten la misma lógica de programación para los demás ejes de movimiento, como lo vemos a continuación:



Network 28

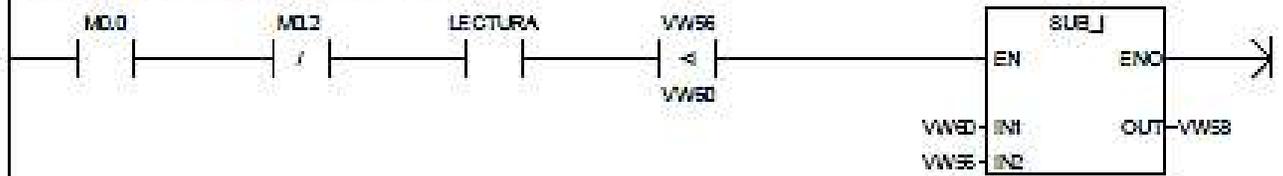
Si es posición mayor, se ve cuantos pules avanza



Simbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I0.5	Lectura de datos

Network 29

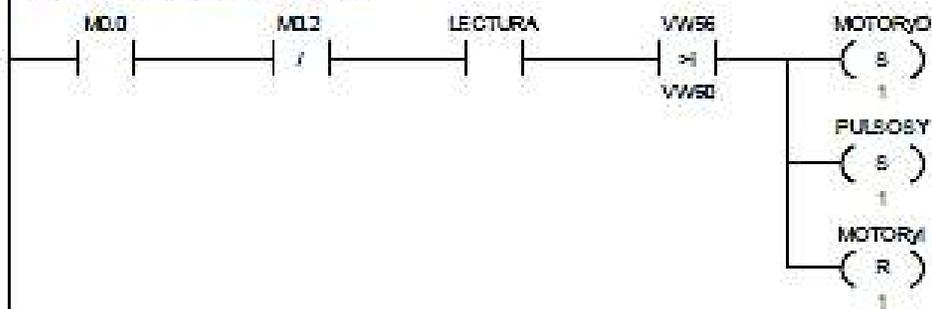
Si es posición menor, se ve cuantos pules retrocede



Simbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I0.5	Lectura de datos

Network 30

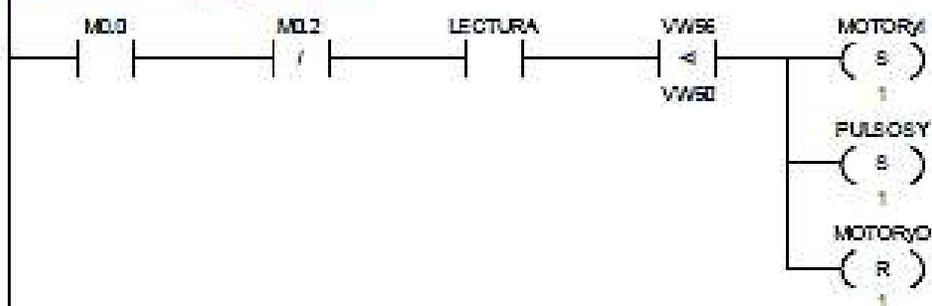
Cirol de motor a la derecha y activo pules



Simbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I0.5	Lectura de datos
MOTORyD	Q0.2	Motor eje y Derecha
MOTORyI	Q0.3	Motor eje y Izquierda
PULSOSY	Q0.7	Genera pules y

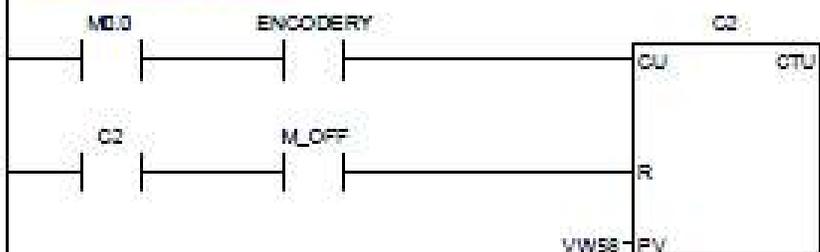
Network 31

Cirol de motor a la izquierda y activo pules



Network 32

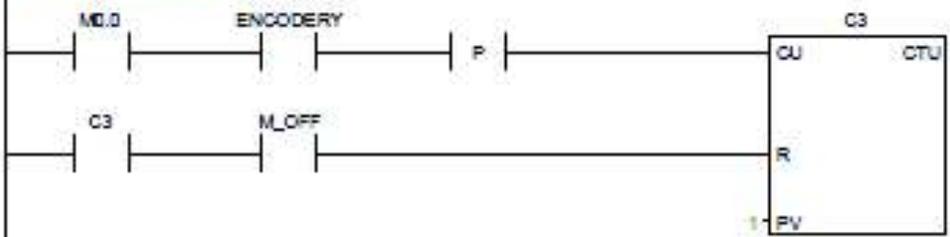
Contador de pulsos del encoder



Simbolo	Dirección	Comentario
ENCODERY	I.3	Encoder Y
M_OFF	I.1	Master OFF. Apagado de EMERGENCIA

Network 33

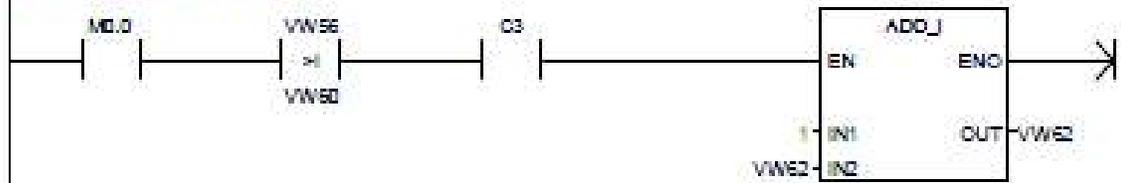
Contador para posición actual



Simbolo	Dirección	Comentario
ENCODERY	I.3	Encoder Y
M_OFF	I.1	Master OFF. Apagado de EMERGENCIA

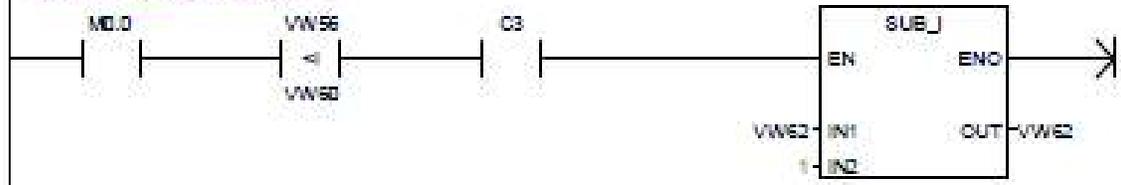
Network 34

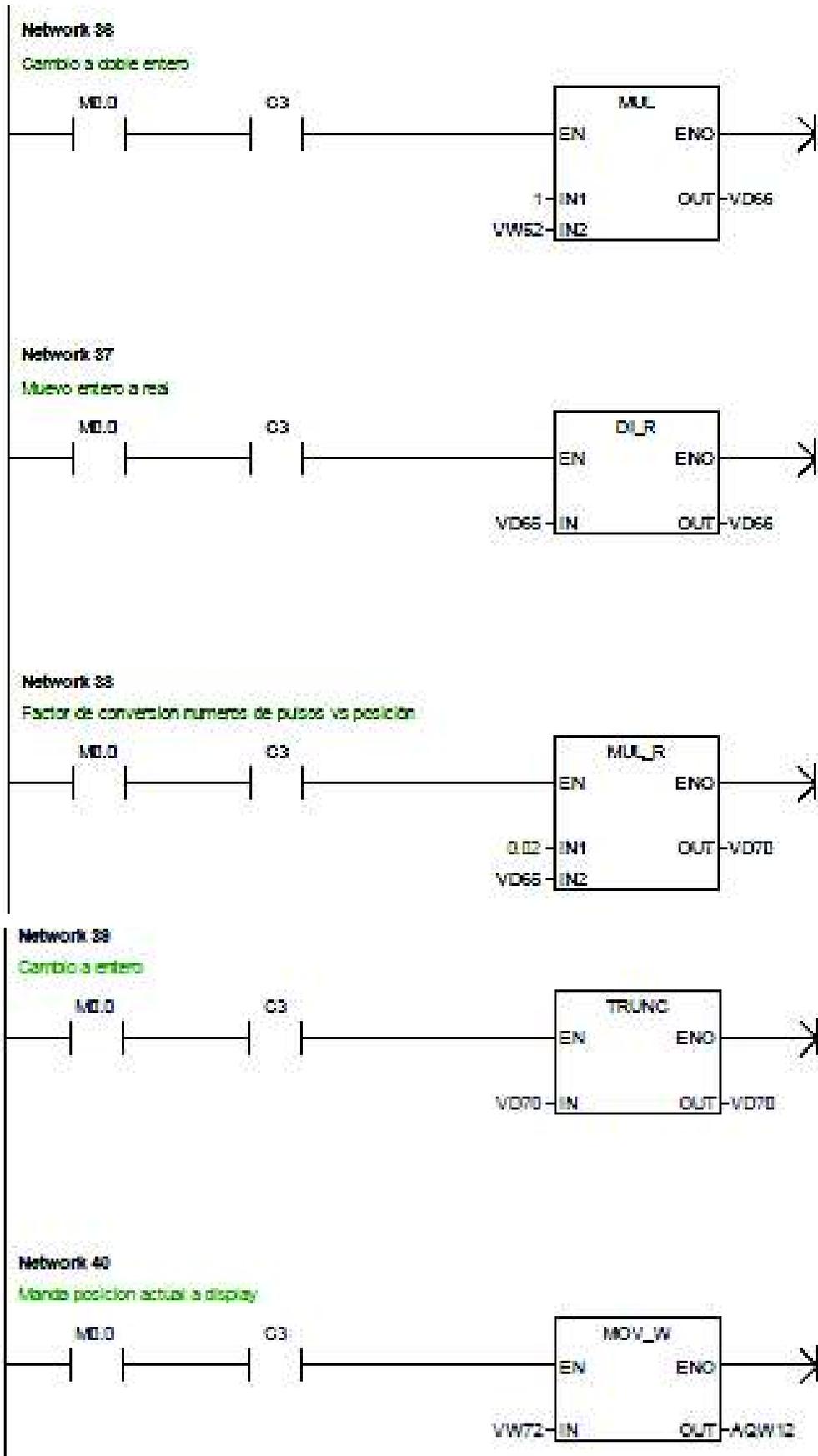
Posición deseada cuando avanza

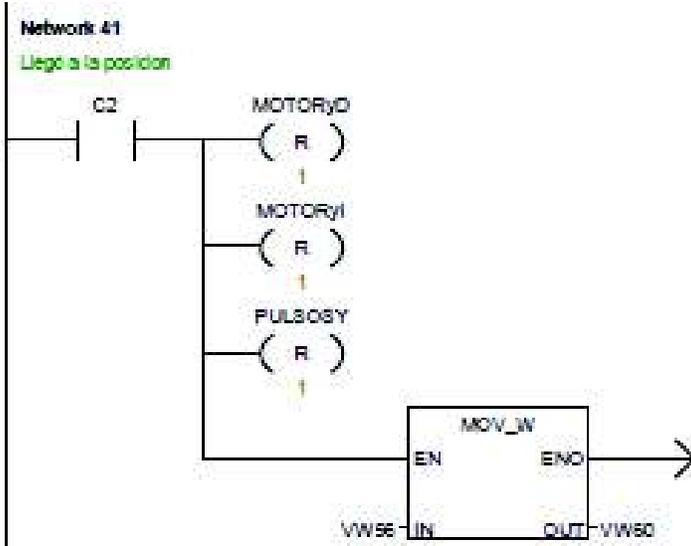


Network 35

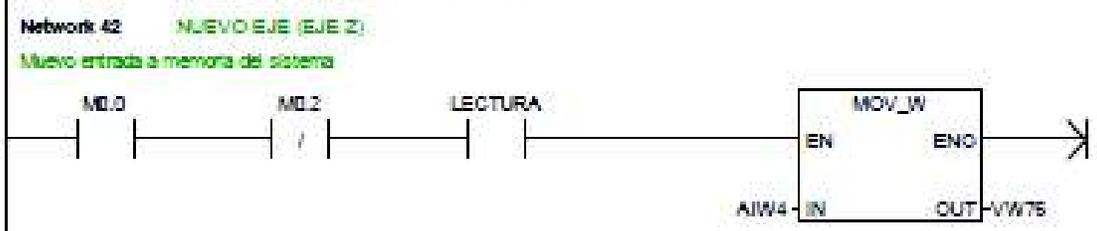
Posición deseada cuando retrocede



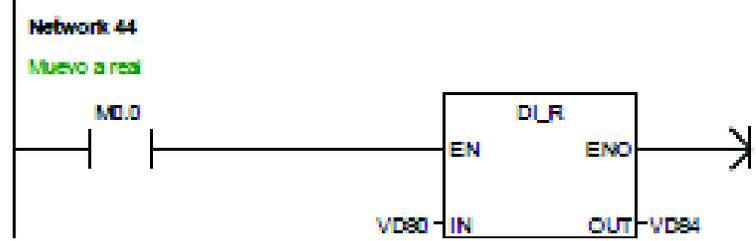
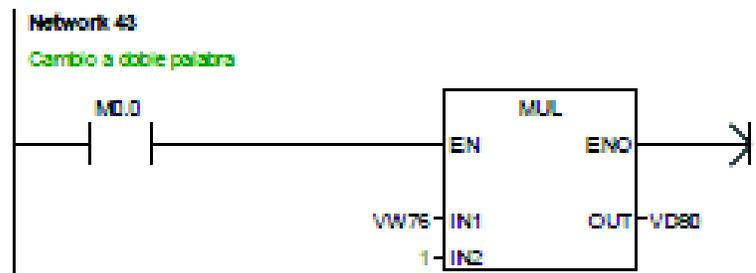




Simbolo	Dirección	Comentario
MOTORyD	Q0.2	Motor eje y Derecha
MOTORyI	Q0.3	Motor eje y Izquierda
PULSOSY	Q0.7	Genera pulsos y



Simbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I0.5	Lectura de datos



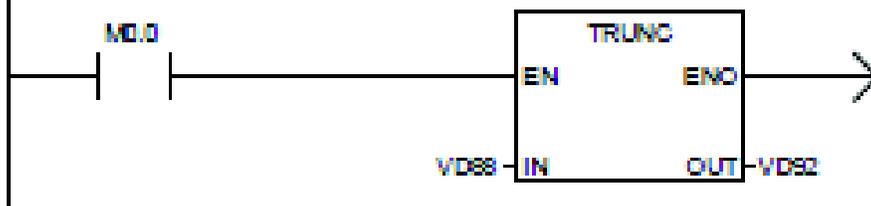
Network 45

Ver posición vs pulsos de encoder



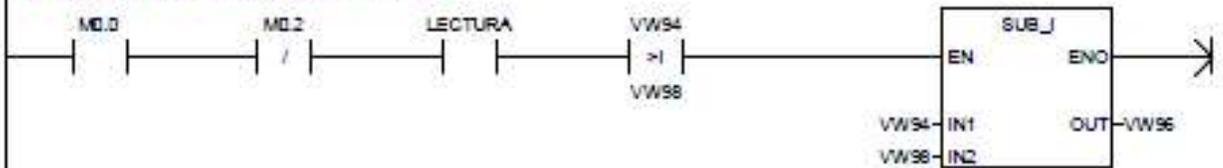
Network 48

Cambio a palabra



Network 47

Si es posición mayor, se ve cuantos pulsos avanza



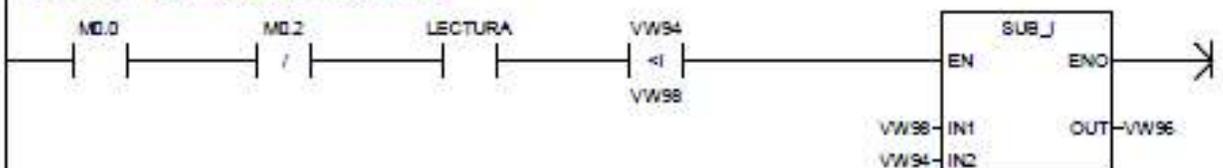
Simbolo
LECTURA

Dirección
D.5

Comentario
Lectura de datos

Network 48

Si es posición menor, se ve cuantos pulsos retrocede



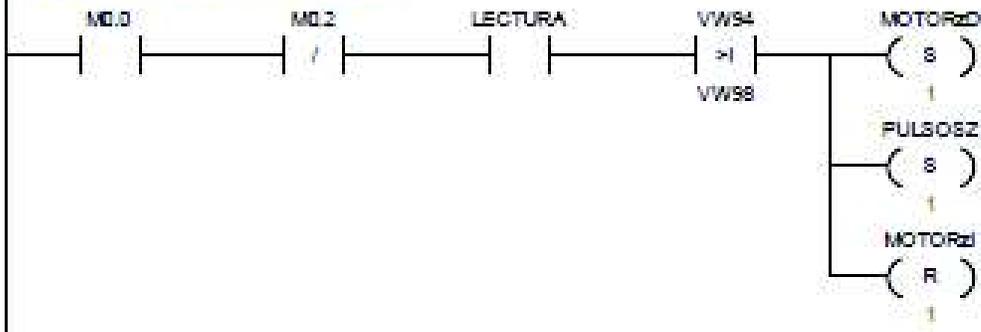
Simbolo
LECTURA

Dirección
D.5

Comentario
Lectura de datos

Network 49

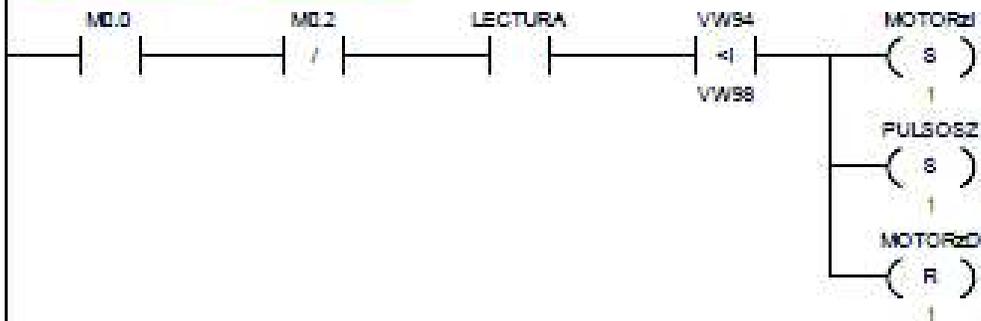
Giro de motor a la derecha y activo pulsos



Símbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I.5	Lectura de datos
MOTORzD	Q0.4	Motor eje z Derecha
MOTORzl	Q0.5	Motor eje z izquierda
PULSOSZ	Q1.0	Genera pulsos z

Network 50

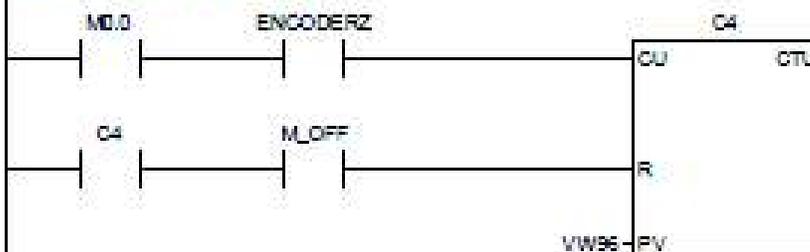
Giro de motor a la izquierda y activo pulsos



Símbolo	Dirección	Comentario
LECTURA	I.5	Lectura de datos
MOTORzD	Q0.4	Motor eje z Derecha
MOTORzl	Q0.5	Motor eje z izquierda
PULSOSZ	Q1.0	Genera pulsos z

Network 51

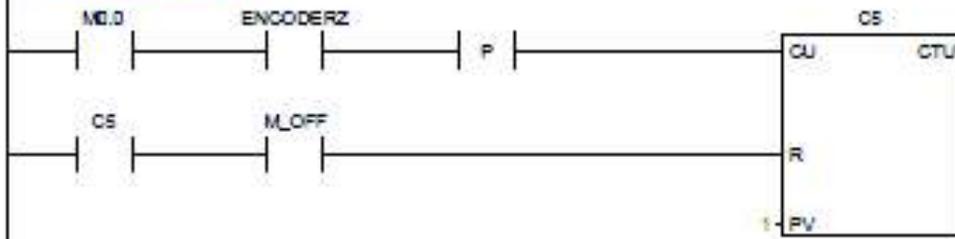
Contador de pulsos del encoder



Símbolo	Dirección	Comentario
ENCODERZ	I.4	Encoder Z
M_OFF	I.1	Master OFF. Apagado de EMERGENCIA.

Network 62

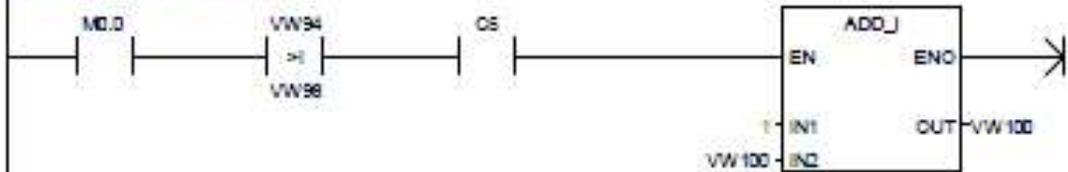
Contador para posición actual



Simbolo	Dirección	Comentario
ENCODERZ	ID.4	Encoder Z
M_OFF	ID.1	Master OFF. Apagado de EMERGENCIA

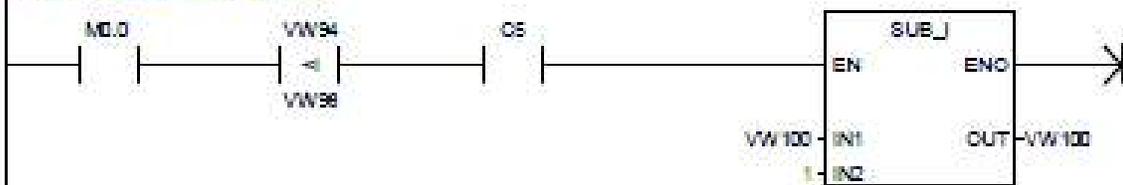
Network 63

Posición deseada cuando avanza



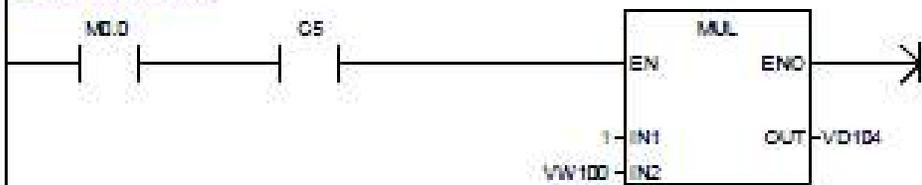
Network 64

Posición deseada cuando retrocede



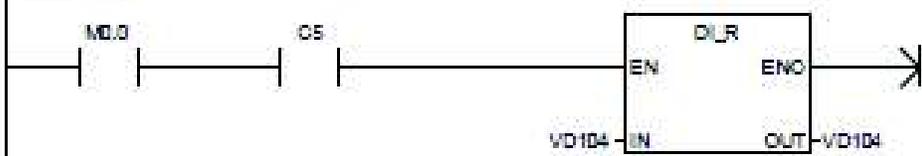
Network 65

Cambio a doble entero



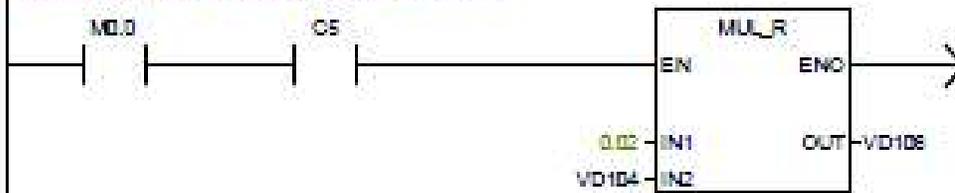
Network 66

Nuevo a real



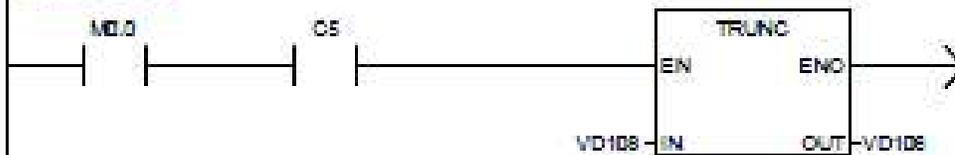
Network 57

Factor de conversión números de pulsos vs posición



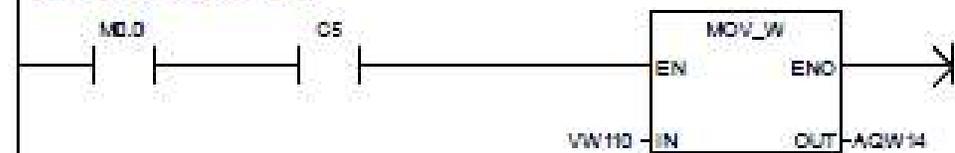
Network 58

Cambio a entero



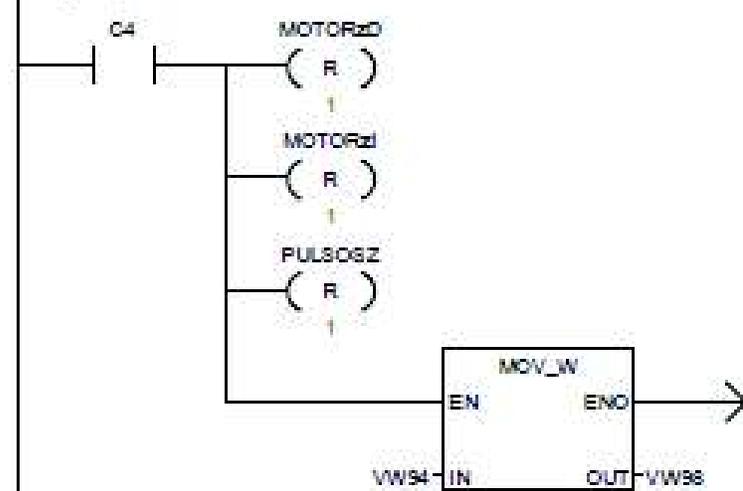
Network 59

Manda posición actual a display

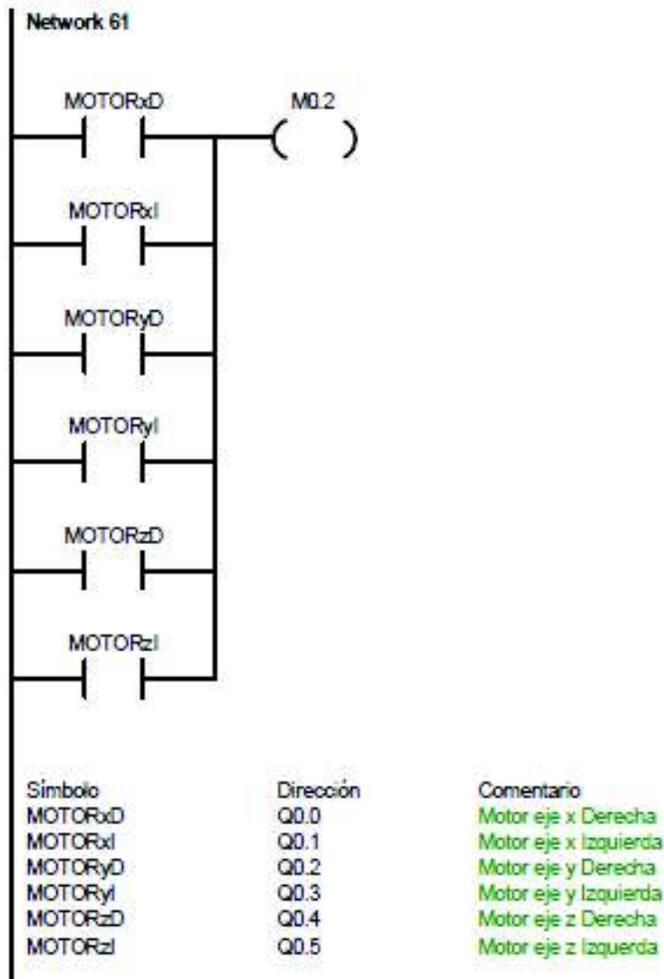


Network 60

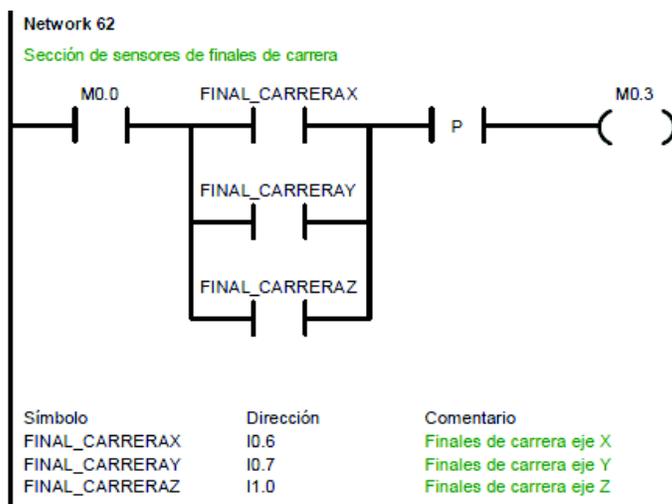
Llegó a la posición



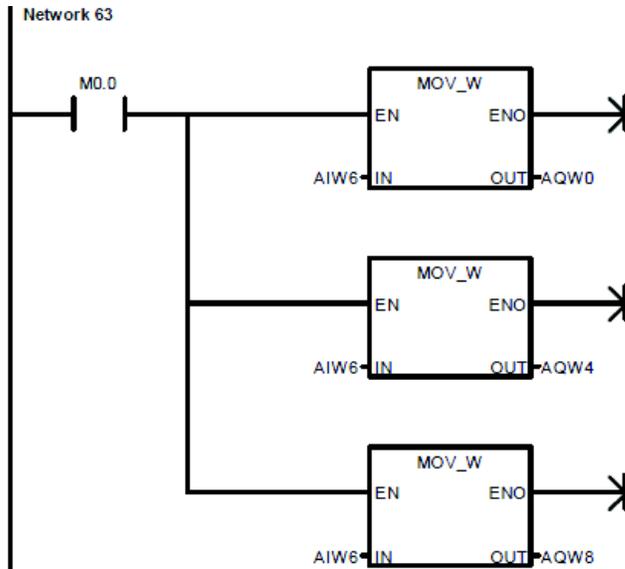
Símbolo	Dirección	Comentario
MOTORzD	Q0.4	Motor eje z Derecha
MOTORzl	Q0.5	Motor eje z Izquierda
PULSOSZ	Q1.0	Genera pulsos z



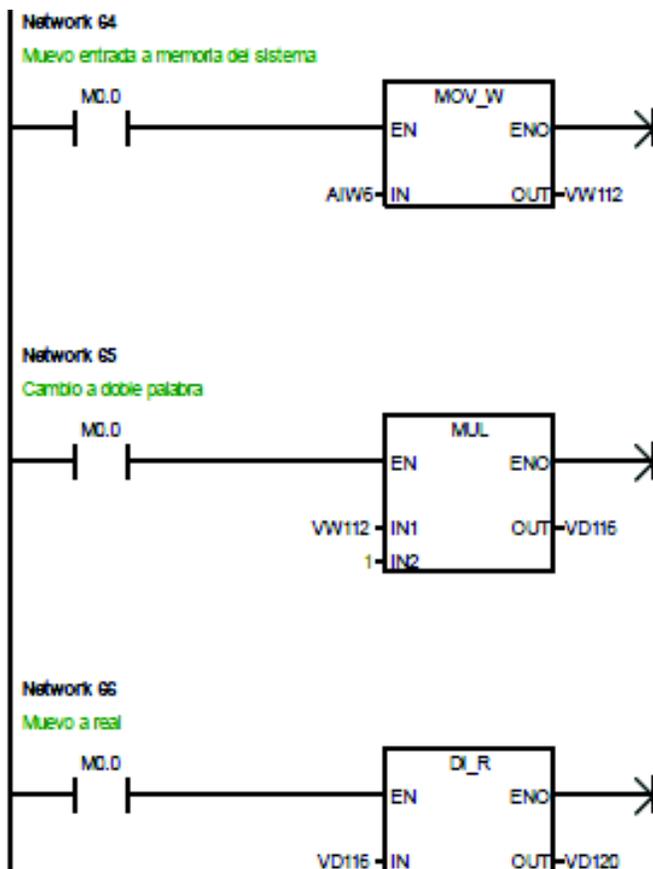
Segmento 61: Si cualquier eje se encuentra en movimiento se activará una memoria M0.2 que impedirá la lectura de datos, a menos que lo ejes terminen de moverse.

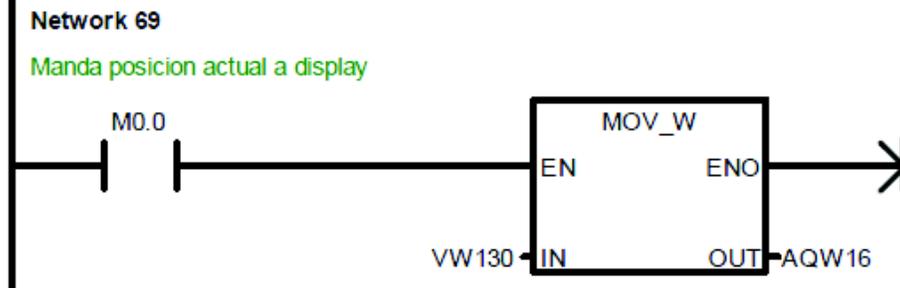
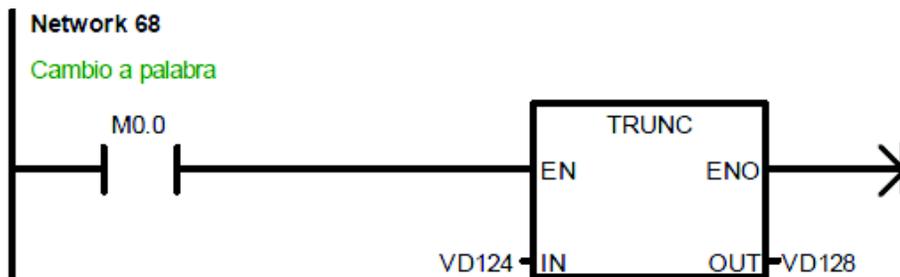
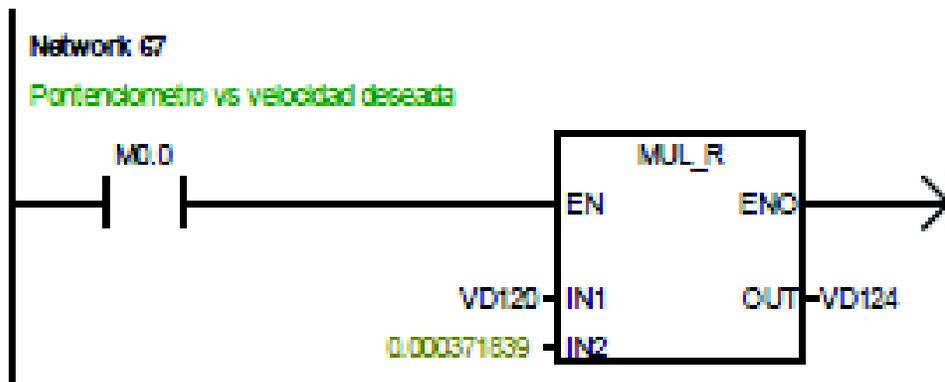


Segmento 62: Al pulsarse cualquier final de carrera ubicados en los ejes de la máquina, se activa la memoria M0.3 la cual detiene el movimiento de todos los motores y activa una luz piloto de emergencia. Este comportamiento es similar al botón I0.1 (Master OFF).



Segmento 63: En este segmento de código se tiene la lectura del valor analógico del potenciómetro correspondiente a la entrada AIW6. Este valor varía en 0 y 10V, lo cual correspondería a una lectura entre 0 y 32767 bits y corresponde a la velocidad deseada en los servomotores. Luego se mueve estos valores a las salidas análogas correspondientes a los variadores de frecuencia de los motores.





Segmento 64, 65, 66, 67, 68,69: Se realiza la lectura del potenciómetro encargado de controlar la velocidad de giro de los motores y se convierte el valor resultante según la escala determinada asociada con una variable. Posteriormente, el valor final resultante se muestra en un display correspondiente a la salida analoga AQW6. Se toma en cuenta que el voltaje leído del potenciómetro varía entre 0 y 10V (0 a 32767 bits) y que la velocidad de avance de los motores varía entre 0 y 12 m/min.

2.7. Simulación

2.7.1. Software simulación

El Software utilizado para simular el PLC es el S7_200, el cual permite simular toda la gama de PLCs SIEMENS SIMATIC S7-200. La programación se puede transferir al simulador S7_200 de dos formas:

- Exportando el programa desde el STEP 7 – MicroWIN en formato AWL y luego cargarlo al S7_200 (Proceso que se va a utilizar).
- A través del portapapeles, en programa de formato AWL o como módulo de datos DB1.

El programa permite configurar el tipo de CPU () y agregar hasta 7 módulos de entradas y salidas digitales y analógicas (Figura 2.93).

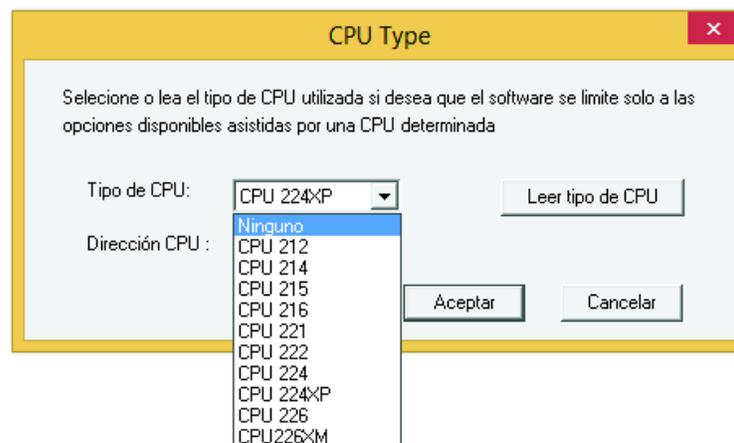


Figura 2.92. S7_200 Selección de CPU
(Fuente: Propia)

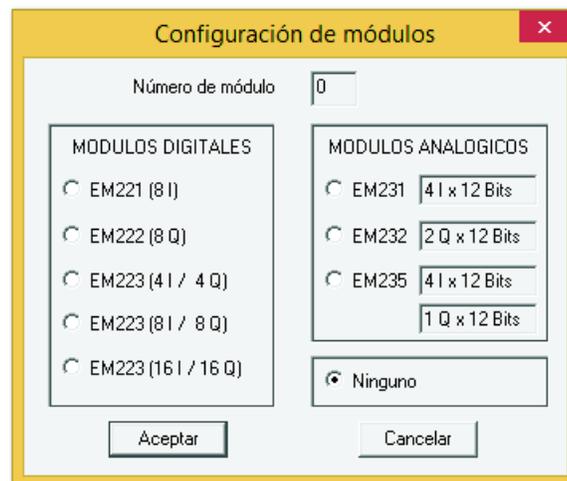


Figura 2.93. S7_200 Módulos de expansión
(Fuente: Propia)

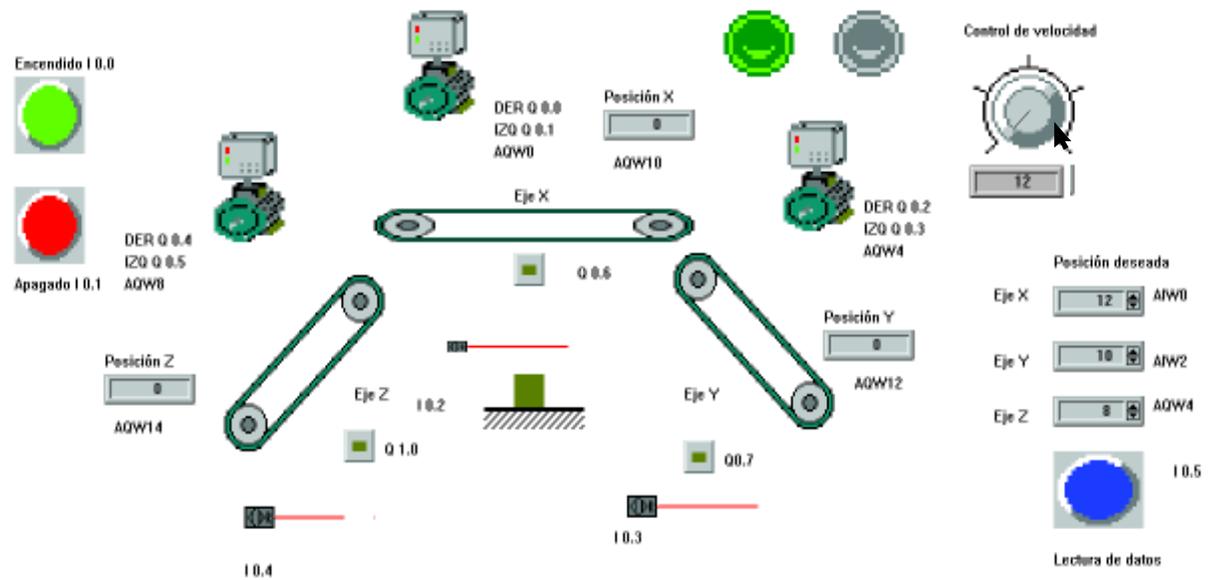


Figura 2.95. Simulación de ingreso de parámetros (velocidad de avance y coordenadas).
(Fuente: Propia)

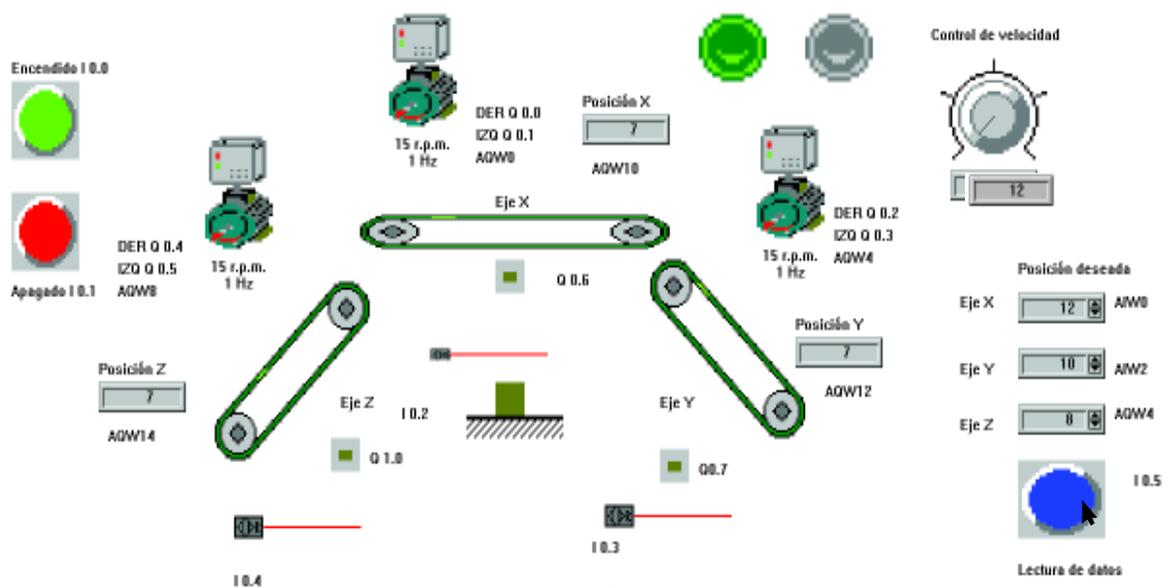


Figura 2.96. Simulación. Lectura de datos e inicio de movimiento de servomotores.
(Fuente: Propia)

Cuando se inicia el movimiento de los servomotores, se activa también un dispensador de objetos. Cada objeto generado por el dispensador es detectado por una barrera réflex, lo cual simula el conteo de pulsos por parte del encoder del servomotor. Las coordenadas de posición de los ejes de la máquina CNC pueden visualizarse en un display. Cuando se alcanza la posición deseada (información dada por el encoder) el motor detiene su movimiento (Figura 2.97).

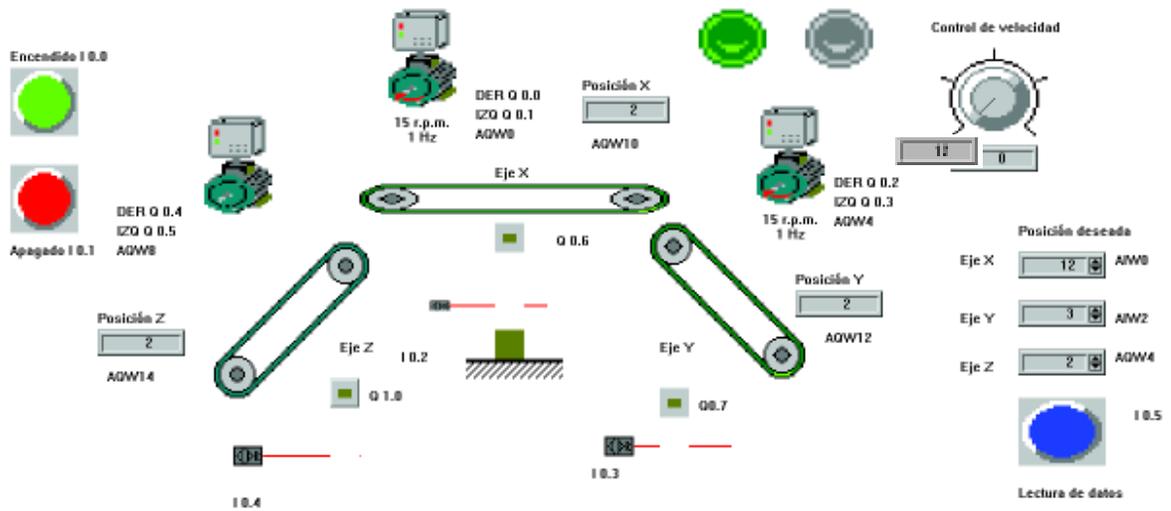


Figura 2.97. Simulación. Visualización de la posición actual de los ejes de máquina CNC.
(Fuente: Propia)

Finalmente ante cualquier emergencia se tiene el pulsador de apagado, el cual al ser pulsado detiene por completo el movimiento de los servomotores, a la vez que activa una luz piloto roja de emergencia (Figura 2.98).

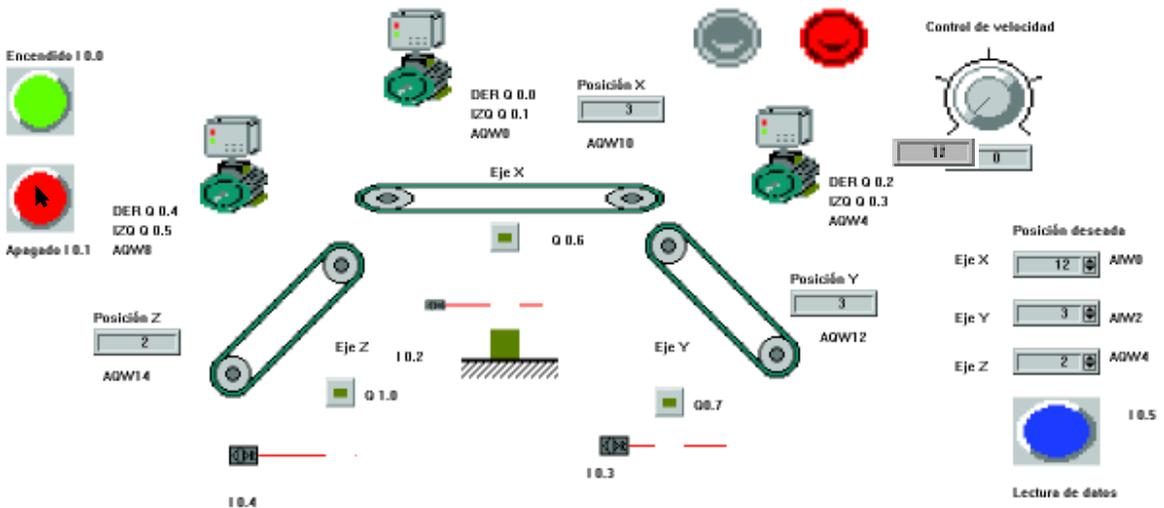


Figura 2.98. Simulación paro de emergencia en panel de control.
(Fuente: Propia).

2.7.2.3. Señalización y seguridad

Como medios de señalización se tiene dos luces pilotos, una verde y una roja, las cuales se activan bajo distintas condiciones.

Cuando se presiona el botón de encendido se activa la luz piloto verde, la cual indica que la máquina esta lista para trabajar (Figura 2.99).



Figura 2.99. Simulación. Señalización y seguridad, botón de encendido pulsado.
(Fuente: Propia)

Al accionar el pulsador de apagado se desactiva la luz piloto verde y se activa la luz piloto roja, señal de que la máquina ha detenido su funcionamiento y no permite el ingreso de instrucciones (Figura 2.100).



Figura 2.100. Simulación. Señalización y seguridad, pulsador de apagado accionado.
(Fuente: Propia)

De manera similar al pulsador “Apagado”, cuando se acciona cualquier final de carrera de la máquina CNC, se activa una luz piloto rojo que indica el funcionamiento inusual de la máquina (Figura 2.101).



Figura 2.101. Simulación. Señalización y emergencia, finales de carrera accionados.
(Fuente: Propia).

2.7.2.4. Panel de control

En el panel de control se visualiza los elementos con los cuales interactúa el usuario.

El accionamiento de la máquina empieza al pulsar el botón de “Encendido”. Es imposible que la máquina ejecute sus funciones a menos que se haya pulsado este botón (Figura 2.102).

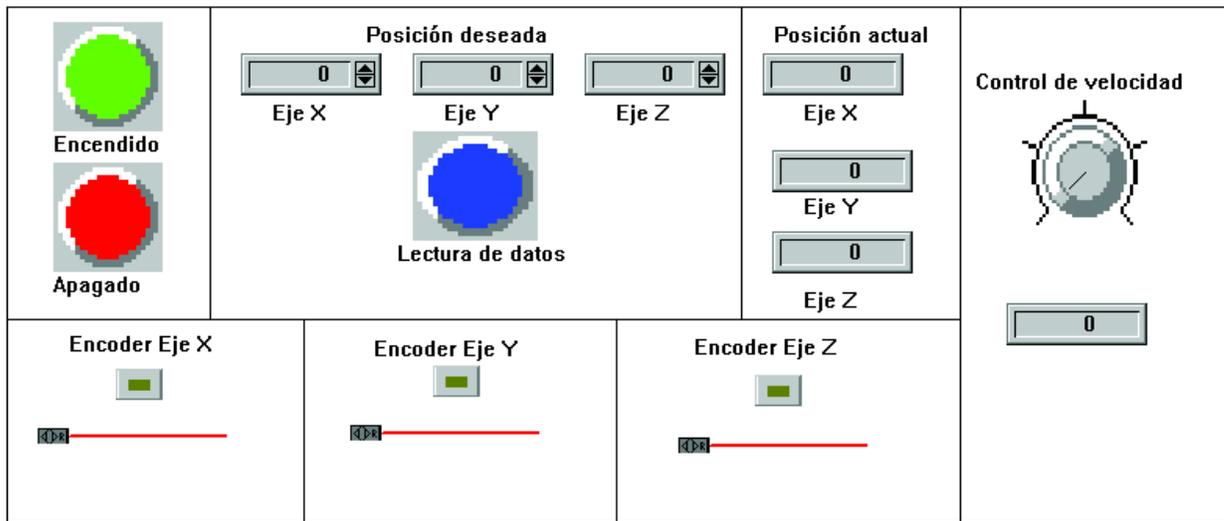


Figura 2.102. Simulación. Panel de control, accionamiento de pulsador “Encendido”.
(Fuente: Propia).

A continuación se introducen las coordenadas de la posición donde se desea que se desplace la herramienta de corte de la máquina CNC, y con la manipulación del potenciómetro se configura le velocidad deseada (Figura 2.103).

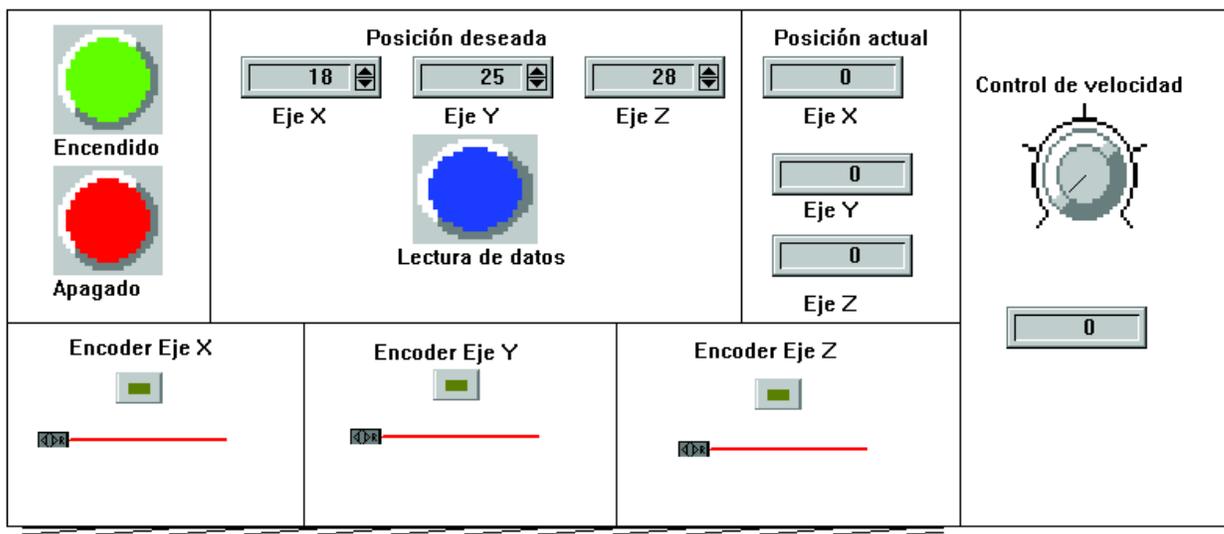


Figura 2.103. Simulación. Panel de control, ingreso de parámetros.
(Fuente: Propia).

Una vez ingresados las coordenadas de posicionamiento, al accionar el pulsador de lectura de datos se observa como la posición actual varía en función de la deseada y a la velocidad configurada (Figura 2.104).

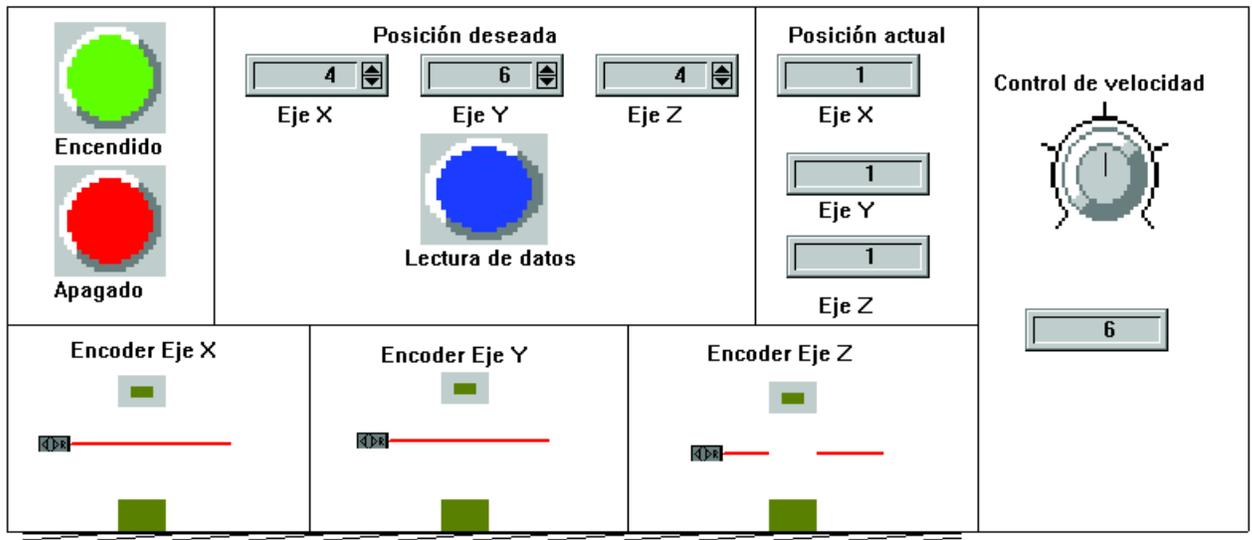


Figura 2.104. Simulación. Panel de control, lectura de datos e inicio de movimiento.
(Fuente: Propia).

Una vez alcanzada la posición deseada el sistema de control vuelve a las condiciones iniciales, listo para el ingreso de nuevos valores (Figura 2.105).

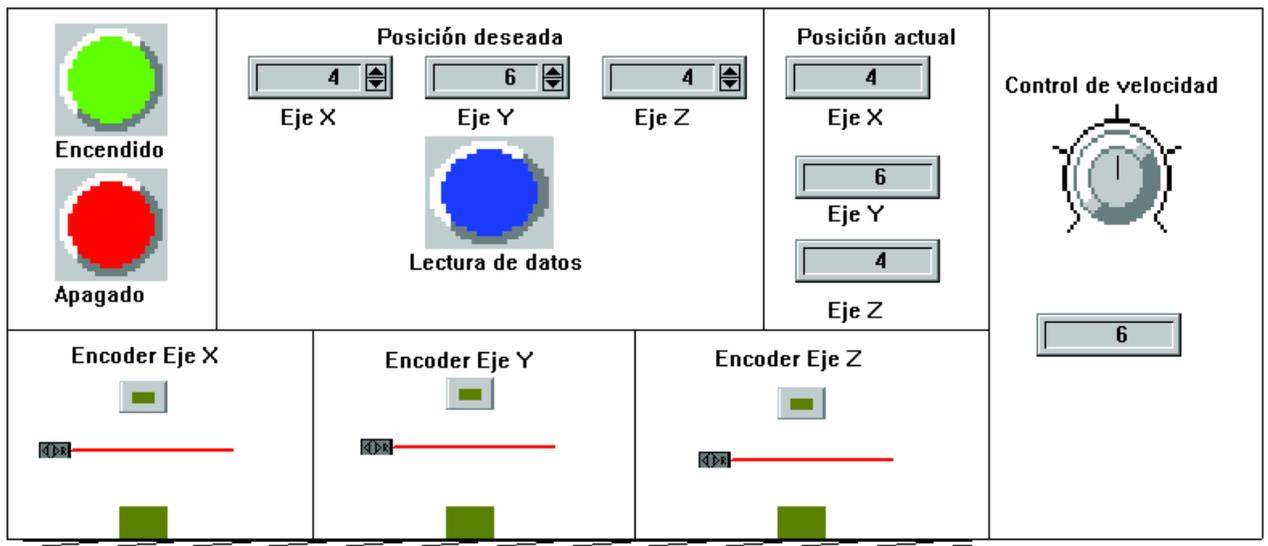


Figura 2.105. Simulación. Panel de control, posición actual es igual a deseada.
(Fuente: Propia).

2.8. Presupuesto

2.8.1. Costo de Materiales

En este apartado se incluyen todos los materiales necesarios para la fabricación de los elementos requeridos en base de procesos de manufactura específicos.

Tabla 2.97. Costo de materiales para mecanizado de elementos de la máquina

Elemento	Descripción	Fuente	Unidad	Cant.	Precio unitario	Precio total
Estructura	Tubo cuadrado 50x50x2 mm	[78]	6 m	4	\$ 21,88	\$ 87,52
Soporte base sobre las guías Ejes X e Y	Ángulo de 40x40x3 mm	[78]	6 m	0,5	\$ 13,32	\$ 6,66
Soporte de fijación de ejes guía en los Ejes X e Y	Ángulo de 50x50x3 mm	[78]	6 m	0,5	\$ 16,82	\$ 8,41
Soporte de fijación de ejes guía del Eje Z	Ángulo de 60x60x6 mm	[78]	6 m	0,5	\$ 39,25	\$ 19,63
Unión de soportes a estructura	Ángulo de 70x70x6 mm	[78]	6 m	0,5	\$ 46,15	\$ 23,08
Guías del Eje Z	Eje de 25 mm	[78]	6 m	0,5	\$ 28,80	\$ 14,40
Guías de los Ejes X e Y	Eje de 40 mm	[78]	6 m	1	\$ 73,87	\$ 73,87
Base carro del Eje Z - Porta herramientas	Placa de acero 270x220x10 mm	[78]	u	1	\$ 6,60	\$ 6,60
Base carro del Eje X	Placa de acero 580x115x4 mm	[78]	u	1	\$ 3,52	\$ 3,52
Mesa de trabajo - Base carro Eje Y	Perfil de aluminio mesa ranurada	[79]	m	5,85	\$ 37,46	\$ 219,14
Fijación Tornillo sin fin - carros de los Ejes X y Z	Bloque de aluminio 100x60x40 mm	[80]	kg	1,35	\$ 2,45	\$ 3,31
Fijación Tornillo sin fin - carro del Eje Y	Bloque de aluminio 100x85x40 mm	[80]	kg	0,93	\$ 2,45	\$ 2,28
Total						\$ 468,41

(Fuente: Propia)

2.8.2. Costo de Mano de Obra (Fabricación)

El costo de mano de obra se trata del costo del proceso de fabricación para cada elemento de la maquina diseñada. En el análisis de dicho costo se considera las diferentes operaciones que se requieren para fabricar cada elemento. El costo se calcula en base al tiempo estimado de cada proceso y al costo hora-hombre-máquina (HHM) de cada

proceso. Dicho costos se encuentran estipulados en el artículo “Salarios mínimos sectoriales del 2018” publicado por Ministerio del Trabajo [81].

Tabla 2.98. Costos de Fabricación

Maquinaria Costos HHM Pieza	Cantidad	Torno		Taladro		Fresadora		Soldadura		Corte		Operario		Total USD
		10	[\$/h]	8	[\$/h]	15	[\$/h]	15	[\$/h]	7	[\$/h]	5	[\$/h]	
		Min.	USD	Min.	USD	Min.	USD	Min.	USD	Min.	USD	Min.	USD	
Estructura	1	0	\$ -	30	\$ 4,00	0	\$ -	120	\$ 30,00	30	\$ 3,50	20	\$ 1,67	\$ 39,17
Soporte base sobre las guías Ejes X e Y	6	0	\$ -	10	\$ 1,33	0	\$ -	8	\$ 2,00	5	\$ 0,58	3	\$ 0,25	\$ 25,00
Soporte de fijación de ejes guía en los Ejes X e Y	8	0	\$ -	10	\$ 1,33	0	\$ -	5	\$ 1,25	5	\$ 0,58	3	\$ 0,25	\$ 27,33
Soporte de fijación de ejes guía del Eje Z	2	0	\$ -	10	\$ 1,33	0	\$ -	8	\$ 2,00	5	\$ 0,58	3	\$ 0,25	\$ 8,33
Unión de soportes a estructura	6	0	\$ -	10	\$ 1,33	0	\$ -	10	\$ 2,50	5	\$ 0,58	3	\$ 0,25	\$ 28,00
Guías del Eje Z	2	25	\$ 4,17	0	\$ -	0	\$ -	5	\$ 1,25	0	\$ -	2	\$ 0,17	\$ 11,17
Guías de los Ejes X e Y	4	25	\$ 4,17	0	\$ -	0	\$ -	5	\$ 1,25	0	\$ -	2	\$ 0,17	\$ 22,33
Base carro del Eje Z - Porta herramientas	1	0	\$ -	20	\$ 2,67	0	\$ -	0	\$ -	15	\$ 1,75	10	\$ 0,83	\$ 5,25
Base carro del Eje X	1	0	\$ -	8	\$ 1,07	0	\$ -	5	\$ 1,25	15	\$ 1,75	10	\$ 0,83	\$ 4,90
Mesa de trabajo - Base carro Eje Y	1	0	\$ -	0	\$ -	0	\$ -	0	\$ -	0	\$ -	30	\$ 2,50	\$ 2,50
Fijación Tornillo sin fin - carros de los Ejes X y Z	2	0	\$ -	10	\$ 1,33	30	\$ 7,50	0	\$ -	0	\$ -	10	\$ 0,83	\$ 19,33
Fijación Tornillo sin fin - carro del Eje Y	1	0	\$ -	10	\$ 1,33	40	\$ 10,00	0	\$ -	0	\$ -	10	\$ 0,83	\$ 12,17
TOTAL													\$ 205,48	

(Fuente: Propia)

2.8.3. Costo de elementos Normalizados

Aquí se desglosan todos los elementos normalizados o estandarizados, presentes en el mercado y fabricados en base a normas, dimensiones y capacidad de trabajo específicas.

Tabla 2.99. Costos de elementos Normalizados y Estandarizados.

Elemento	Descripción	Fuente	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Rodamientos	Lineales de ϕ 25 mm SBR25uu HIWIN	[82]	u	4	\$ 22,40	\$ 89,60
	De bolas SKF 6191	[83]	u	24	\$ 7,45	\$ 178,80
Pernos hexagonales	M4x0,7x45 - ISO 8765	[84]	u	12	\$ 0,08	\$ 0,96
	M5x0,8x30 - ISO 8765	[84]	u	8	\$ 0,10	\$ 0,80
	M5x0,8x65 - ISO 8765	[84]	u	6	\$ 0,14	\$ 0,84
	M5x0,8x70 - ISO 8765	[84]	u	12	\$ 0,15	\$ 1,80
	M7x1x60 - ISO 8765	[84]	u	16	\$ 0,15	\$ 2,40
	M8x1x50 - ISO 8765	[84]	u	15	\$ 0,18	\$ 2,70
	M12x1,25x40-ISO 8765	[84]	u	24	\$ 0,26	\$ 6,24
Arandelas planas	M5 - DIN 125 A	[84]	u	26	\$ 0,08	\$ 2,08
	M7 - DIN 125 A	[84]	u	16	\$ 0,10	\$ 1,60
	M8 - DIN 125 A	[84]	u	15	\$ 0,10	\$ 1,50
Tuercas	M4x0,7 - DIN 439 B	[84]	u	12	\$ 0,11	\$ 1,32
	M5x0,8 - DIN 439 B	[84]	u	26	\$ 0,12	\$ 3,12
	M7x1 - DIN 439 B	[84]	u	16	\$ 0,17	\$ 2,72
	M8x1 - DIN 439 B	[84]	u	15	\$ 0,18	\$ 2,70
	M12x1,25 - DIN 439 B	[84]	u	48	\$ 0,22	\$ 10,56
Tornillo sin fin con husillo de bolas	ϕ 14x1000 mm - Grade:C7-GCr15 steel	[85]	u	1	\$ 87,00	\$ 87,00
	ϕ 25x1300 mm - Grade:C7-GCr15 steel	[85]	u	1	\$ 258,00	\$ 258,00
	ϕ 25x1200 mm - Grade:C7-GCr15 steel	[85]	u	1	\$ 249,00	\$ 249,00
Soporte tornillo sin fin	ϕ 14 - BK14	[86]	2u	1	\$ 22,19	\$ 22,19
	ϕ 25 - BK25	[86]	2u	2	\$ 43,80	\$ 87,60
Acople anti backlash	ϕ 12mm a ϕ 14 mm	[87]	u	1	\$ 16,69	\$ 16,69
	ϕ 25 mm a ϕ 25 mm	[87]	u	2	\$ 94,71	\$ 189,42
Husillo	Husillo CNCER20 de 3kW	[88]	u	1	\$ 310,95	\$ 310,95
Herramienta de planeado	Sandvik CoroMill 415	[89]	u	1	\$ 433,00	\$ 433,00
Placa de corte	Placa 415N-05 02 06M-M30 1040	[89]	10 u	1	\$ 149,00	\$ 149,00
Electrodos LINCOLN	E 7018	[90]	kg	5	\$ 6,00	\$ 30,00
Total						\$ 2.142,59

(Fuente: Propia)

2.8.4. Costo de elementos de Control Automático

Se incluye todos los materiales, insumos eléctricos y electrónicos y equipos necesarios para realizar la automatización del sistema diseñado.

Tabla 2.100. Costos de implementación de Control Automático.

Elemento	Descripción	Fuente	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Motores	OMRON R88M-U05030H	[91]	u	1	\$ 836,60	\$ 836,60
	OMRON R88M-U40030H	[91]	u	2	\$ 1.086,77	\$ 2.173,54
Servodrive	OMRON R88D-UA03H	[91]	u	1	\$ 717,00	\$ 717,00
	OMRON R88D-UA12H	[91]	u	2	\$ 837,00	\$ 1.674,00
PLC	Siemens S7 200 CPU: 224XP	[92]	u	1	\$ 432,00	\$ 432,00
Módulos de expansión	Siemens EM 232 (2 AO)	[92]	u	2	\$ 189,00	\$ 378,00
	Siemens EM 235 (4 AI y 2 AO)	[92]	u	1	\$ 170,00	\$ 170,00
Pulsadores	SIEMENS SIRIUS 3SB35 verde NA	[93]	u	1	\$ 11,36	\$ 11,36
	SIEMENS SIRIUS 3SB35 rojo NC	[93]	u	1	\$ 11,36	\$ 11,36
	SIEMENS SIRIUS 3SB36 negro NA	[93]	u	1	\$ 11,36	\$ 11,36
Fin de carrera	Osiswitch® Clásico XCKL	[93]	u	6	\$ 33,66	\$ 201,96
Display	Loop-powered LCD display 5531A	[94]	u	3	\$ 40,80	\$ 122,40
	Display de Texto SIEMENS SIMATIC HMI TD17	[92]	u	1	\$ 270,00	\$ 270,00
Led	SIEMENS- SIRIUS 3SB3244 Verde	[93]	u	1	\$ 9,64	\$ 9,64
	SIEMENS- SIRIUS 3SB3244 Roja	[93]	u	1	\$ 9,64	\$ 9,64
	SIEMENS- SIRIUS 3SB3244 Naranja	[93]	u	1	\$ 9,64	\$ 9,64
Relé	SIEMENS SIRIUS 3TK2825-1BB40	[93]	u	1	\$ 56,84	\$ 56,84
Gabinete de control	800x600x30 mm		u	1	\$ 150,00	\$ 150,00
Cable eléctrico - potencia	10 AWG - 450/750 V (6 m)	[90]	u	1	\$ 14,16	\$ 14,16
Cable eléctrico - mando	16 AWG - 300/500 V (6m)	[90]	u	1	\$ 7,34	\$ 7,34
Cable eléctrico - conexiones menores	20 AWG - 300 V (6m)	[90]	u	1	\$ 3,54	\$ 3,54
Total						\$ 7.270,38

(Fuente: Propia)

2.8.5. Costos Indirectos

En éste apartado se incluyen los costos del diseño mecánico y de la automatización, además del costo de transporte, montaje, calibración y el costo del Software

Tabla 2.101. Costos Indirectos

Denominación	Tiempo [Horas]	Costo [\$ /h]	Precio
Diseño mecánico	300	15	\$ 4.500,00
Automatización	180	15	\$ 2.700,00
Transporte	10	12	\$ 120,00
Montaje - Calibración	80	8	\$ 640,00
Software	116	5	\$ 580,00
Total			\$ 8.540,00

(Fuente: Propia)

2.8.6. Presupuesto Total de la Máquina

El presupuesto de la máquina es la sumatoria de todos los rubros expuestos antes, adicionalmente se incluye un porcentaje por imprevistos que sirve para solventar cualquier eventualidad que pueda ocurrir durante la construcción, ensamblaje y montaje del equipo ; y también se adiciona un porcentaje por concepto por utilidades.

Tabla 2.102. Presupuesto de la Máquina CNC de 3 Ejes.

Rubro	Precio
Costo Material	\$ 468,41
Costo Mano de Obra	\$ 205,48
Costo de elementos Normalizados	\$ 2.142,59
Costo de Control Automático	\$ 7.270,38
Subtotal (1)	\$ 10.086,86
Imprevistos (10%)	\$ 1.008,69
Subtotal (2)	\$ 11.095,55
Costos Indirectos	\$ 8.540,00
Utilidades (25%)	\$ 2.773,89
Total	\$ 22.409,43

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Planos de taller y conjunto

Como resultado del diseño mecánico se tiene los elementos usados para la construcción del mecanismo de posicionamiento y desplazamiento de la máquina CNC representados de acuerdo a la norma INEN 003 (Código de dibujo técnico mecánico) en planos, que se encuentran con sus dimensiones finales y tolerancias constructivas en el ANEXO XVII.

3.1.2. Simulación y programación de PLC S7-200

Una vez desarrollada la programación ladder del PLC Siemens, se procedió a comprobar su correcto funcionamiento mediante el simulador PC_SIMU. De dicha simulación, se detalla a continuación los aspectos más relevantes:

Cumplimiento

- Se simuló el ingreso de coordenadas de posición en milímetros y su interpretación en pulsos digitales para lectura del encoder.
- Se logró representar el funcionamiento del encoder mediante un dispensador de objetos y una barrera réflex.
- Una vez ingresadas las coordenadas de posición deseadas, se logró simular la operación de los motores en correspondencia al funcionamiento de encoders.
- Se logró reconocer cuando una coordenada es menor o mayor a la ingresada anteriormente, para definir el sentido de giro de los motores: sentido horario u antihorario.
- Se logró calcular la posición actual de la herramienta de corte, en función de los pulsos enviados por el encoder en un momento determinado.

Trabajos a futuro

Debido al alcance del proyecto y al tiempo para su realización, se propone como parte de trabajos futuros, mejorar los siguientes aspectos del presente trabajo:

- Interpretar el código G (lenguaje utilizado en programas de mecanizado CNC) en coordenadas o cualquier otro tipo de dato que pueda interpretar un PLC para realizar movimientos en los diferentes ejes.

- Además del control de posicionamiento y desplazamiento, hace falta implementar un controlador de fuerza que regule el torque de los motores en función de la fuerza requerida de corte.
- Incluir sistemas auxiliares y secundarios al diseño propuesto. Tales como: sistema de refrigeración, sistema de cambio automático de herramienta, entre otros.
- Ausencia de una interfaz gráfica donde se visualice la trayectoria a ser realizada por la herramienta de corte, lo cual es útil para prevenir colisiones entre la herramienta y la pieza de trabajo.

3.1.3. Análisis de costos.

El objetivo principal de este trabajo de titulación es diseñar los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de una máquina CNC de bajo costo, que sea accesible para el mercado nacional. Adicionalmente a esto, la construcción de dicha máquina debería realizarse con mano de obra ecuatoriana, y con materia prima disponible en el Ecuador.

Antes de realizar un análisis de precios con respecto a la competencia hace falta aclarar que el diseño propuesto no cuenta con el diseño de sistemas secundarios y protecciones como: el sistema de refrigeración, el sistema de cambio de herramienta automático, entre otros sistemas. Adicional a esto también hace falta realizar una interfaz hombre máquina, amigable con el usuario, que permita que el PLC interprete el código G y por ultimo realizar un control de fuerza.

En la Tabla 3.1 se presenta el costo de adquisición del sistema propuesto en comparación al costo de máquinas CNC comercializadas en el país.

Tabla 3.1. Precio de los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de la máquina CNC diseñada vs precio de la competencia.

Concideraiones			
Los sistemas propuestos en este trabajo no representa el total de la infraestructura de las máquinas de la competencia.			
	Diseño propuesto	GSK XK7145A	TRAVIS CNC MM-4
Precio [\$]	22.409,43	47.000	43.000

(Fuente: Propia)

Tomando en cuenta que el diseño propuesto de los sistemas de posicionamiento y desplazamiento con su respectivo control, no representa el diseño total de la infraestructura de las máquinas de la competencia. Se estima que hasta momento el diseño planteado representa un ahorro de aproximadamente el 50% del costo de una máquina de la competencia. Una reducción semejante de precios serviría para fomentar la adquisición de máquinas CNC en la industria ecuatoriana.

3.1.4. Prototipo construido.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se construyó y armó un prototipo físico capaz de emular las operaciones principales de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de trabajo en cada uno de los ejes. El desarrollo de un prototipo resulta de gran beneficio para la implementación y prueba de los dispositivos de accionamiento y control automático.

3.1.4.1. Parte mecánica.

Para el prototipo construido se realizó la estructura en madera debido a la facilidad de ser trabajada y bajo costo que representa la adquisición de la misma (Véase Figura 3.1)



Figura 3.1. Estructura de madera para prototipo
(Fuente: Propia)

En lugar del husillo y la tuerca bolas recirculantes se usó una varilla roscada de diámetro de 8 mm con una tuerca de bronce mecanizada en el torno (Véase Figura 3.2).



Figura 3.2. Varilla roscada con tuerca de Bronce.
(Fuente: Propia)

El resultado final de la parte constructiva del prototipo se puede observar en la Figura 3.3. En la figura se puede identificar las partes correspondientes a los módulos diseñados.

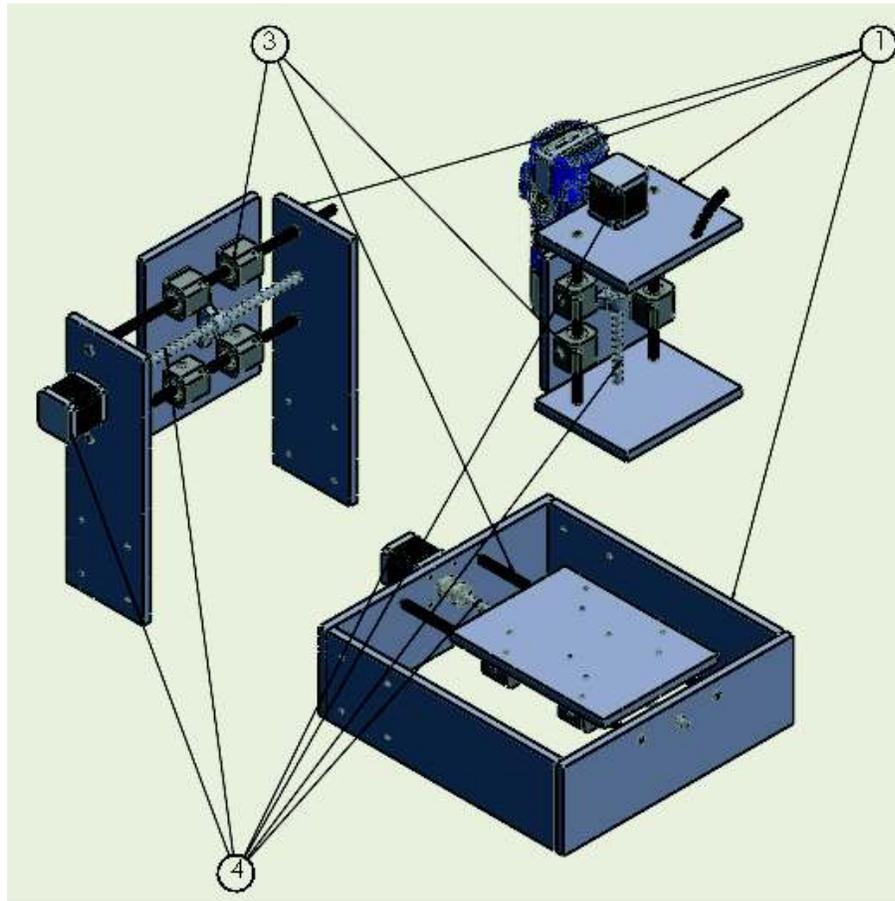


Figura 3.3. CAD del Prototipo CNC.
(Fuente: Propia)

Adicionalmente en Tabla 3.2 se enlistan las principales semejanzas y en la Tabla 3.3 las diferencias entre el prototipo y el diseño propuesto:

Tabla 3.2. Semejanzas entre el prototipo y diseño propuesto

Semejanzas	
Módulo	Descripción
Módulo 1 Sujeción.	<ul style="list-style-type: none"> La bancado posee la misma distribución Los ejes de movimiento son los mismos, 2 la herramienta (Z y X) y 1 la mesa de trabajo (Y).
Módulo 2 Control	<ul style="list-style-type: none"> Se utilizó un PLC para el control
Módulo 3 Guía de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> Las guías utilizadas son ejes lisos. En el eje Z se utiliza la configuración de rodamiento lineal – eje liso.
Módulo 4 Transmisión de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> El eje Z utiliza un servomotor con prestaciones similares a las propuestas. Para la unión de los ejes del motor al tornillo sin fin se utiliza los acoples flexibles anti-backslash

(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Diferencias entre el prototipo y diseño propuesto

Diferencias		
	Prototipo	Diseño Propuesto
Módulo 1 Sujeción.	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura de madera • Mesa de trabajo lisa 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura metálica • Mesa de trabajo ranurada
Módulo 2 Control	<ul style="list-style-type: none"> • PLC utilizado: MicroLogix 1100 de la marca Allen Bradley • Interfaz HMI en Labview 	<ul style="list-style-type: none"> • PLC utilizado: S7-200 CPU: 224XP de la marca SIEMENS • No se consideró interfaz HMI
Módulo 3 Guía de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Ejes X e Y utilizaron una configuración rodamiento lineal – eje liso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizó guías de eje liso con un diseño propio de acoples lineales fabricados en base a rodamientos radiales.
Módulo 4 Transmisión de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Se empleó un eje roscado en lugar de un tornillo de potencia. • No se emplea tuerca de bolas recirculantes • Para los ejes X e Y se utilizó motores paso a paso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se emplea un tornillo de potencia. • Se emplea tuerca de bolas recirculantes • Para los ejes X e Y se recomienda servomotores

(Fuente: Propia)

3.1.4.2. Diseño del control automático

El control automático del prototipo se lleva a cabo mediante un PLC MicroLogix 1100 de la marca Allen-Bradley (Figura 3.4) proporcionado por el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería Mecánica, cuyas características se detallan a continuación:



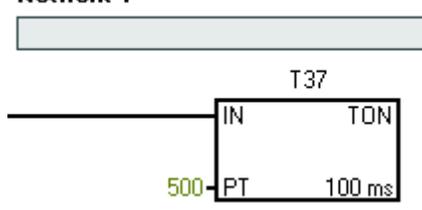
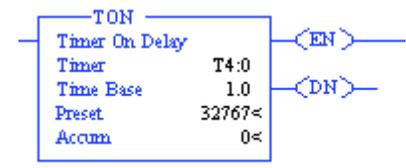
Figura 3.4. PLC MicroLogix 1100 de Allen-Bradley
(Fuente:[95])

- CPU: 1763-L16AWA DC/Relé.
- Alimentación: 24 VDC.
- Entradas digitales: 10 x 24 VDC.
- Salidas digitales: 6 x 24 VDC.
- Puertos COM: 2 puertos RS-232.
- Entradas analógicas: 2.
- Salidas analógicas: 2 salidas PWM de las Digitales.
- Memoria de programa: 4 kbytes
- Memoria de datos: 4 kbytes
- Máx Módulos de ampliación permisibles: 4 módulos.

El programa presentado en la Sección 2.6.2.2 para un PLC Siemens difiere en ciertos aspectos (timers, contadores y bloques de escalamiento) con respecto al programa de control para un PLC de Allan Bradley como se puede notar en la Tabla 3.4 y en la

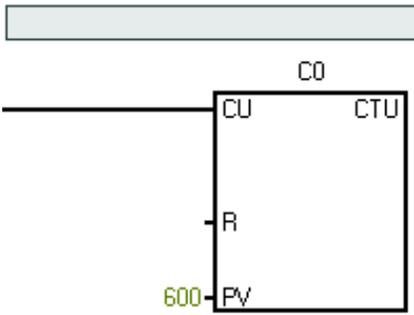
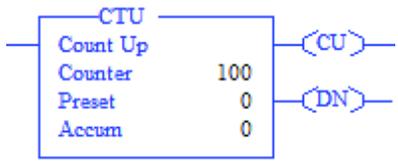
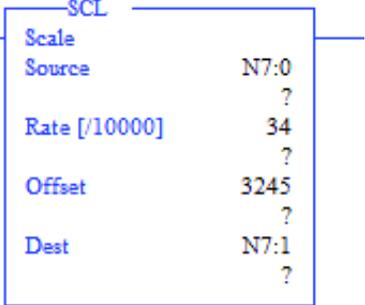
Tabla 3.5. Además el programa se incluye en el ANEXO XVI.

Tabla 3.4. Diferencias entre S7-200 y MicroLogix 1100 parte 1

DIFERENCIAS EN BLOQUES DE PROGRAMACIÓN ENTRE PLC S7200 Y MICROLOGIX 1100	
S7200	MicroLogix 1100
Temporizadores	
<p>Network 1</p> 	
<ul style="list-style-type: none"> • Valor máximo a colocarse en Preset 32767. • El valor del Preset del temporizador puede asociarse a una variable interna del PLC. • No se tiene acceso al valor contado por el timer en cada instante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valor máximo a colocarse en Preset 32767. • El valor del Preset del temporizador después de ser programado es una constante y no puede modificarse una vez ejecutado el programa. • Se tiene acceso al valor contado por el timer en cada instante (ACC). • Se puede cambiar de estado de un contacto de alto (1) a bajo (0) o viceversa, dependiendo si se usa contactos asociados a las salidas de enable (EN) o done (DN).

(Fuente: Propia)

Tabla 3.5. Diferencias entre S7-200 y MicroLogix 1100 parte 2

Contadores	
<p>Network 2</p> 	
<ul style="list-style-type: none"> • Valor máximo a colocarse en Preset 32767. • El valor del Preset del contador puede asociarse a una variable interna del PLC. • No se tiene acceso al valor contado por el contador en cada instante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valor máximo a colocarse en Preset 32767. • El valor del Preset del contador después de ser programado es una constante y no puede modificarse una vez ejecutado el programa. • Se tiene acceso al valor contado por el contador en cada instante (ACC). • La salida done (DN) envía una señal en alto cuando el valor del Acumulador alcanza al Preset. • Si se utiliza la salida CU del contador esta enviará una señal de alto, cada vez que realice un conteo.
Escalamiento	
	
<ul style="list-style-type: none"> • En lo que respecta a variable analógica este tipo de PLC no posee un bloque de escalamiento. • El escalamiento se lo tiene que realizar de manera manual. 	<ul style="list-style-type: none"> • El PLC MicroLogix si posee bloques para el escalamiento de valores analógicos. Se necesita encontrar la relación lineal entre los valores a escalar

(Fuente: Propia)

3.1.4.3. HMI

Se desarrolló una interfaz hombre máquina mediante el software de National Instruments, Labview. Dicha interfaz se observa en la Figura 3.5. Dentro de las principales acciones que interpreta el PLC tenemos:

- Accionamiento de un pulsador (Master ON) para encerrar variables del PLC y puesta a punto para lectura de valores.
- Accionamiento de un pulsador de paro de emergencia (Master OFF) ante cualquier evento inesperado.
- Ingreso del punto deseado de desplazamiento en coordenadas absolutas.
- Accionamiento de un pulsador “lectura” para la adquisición de coordenadas ingresadas.
- Accionamiento de un pulsador de cero pieza, para establecer el origen del sistema de coordenadas absolutas.
- Accionamiento de botones de desplazamientos para los tres ejes sin la necesidad de ingresar datos de coordenadas. Los movimientos pueden ser de avance o retroceso.

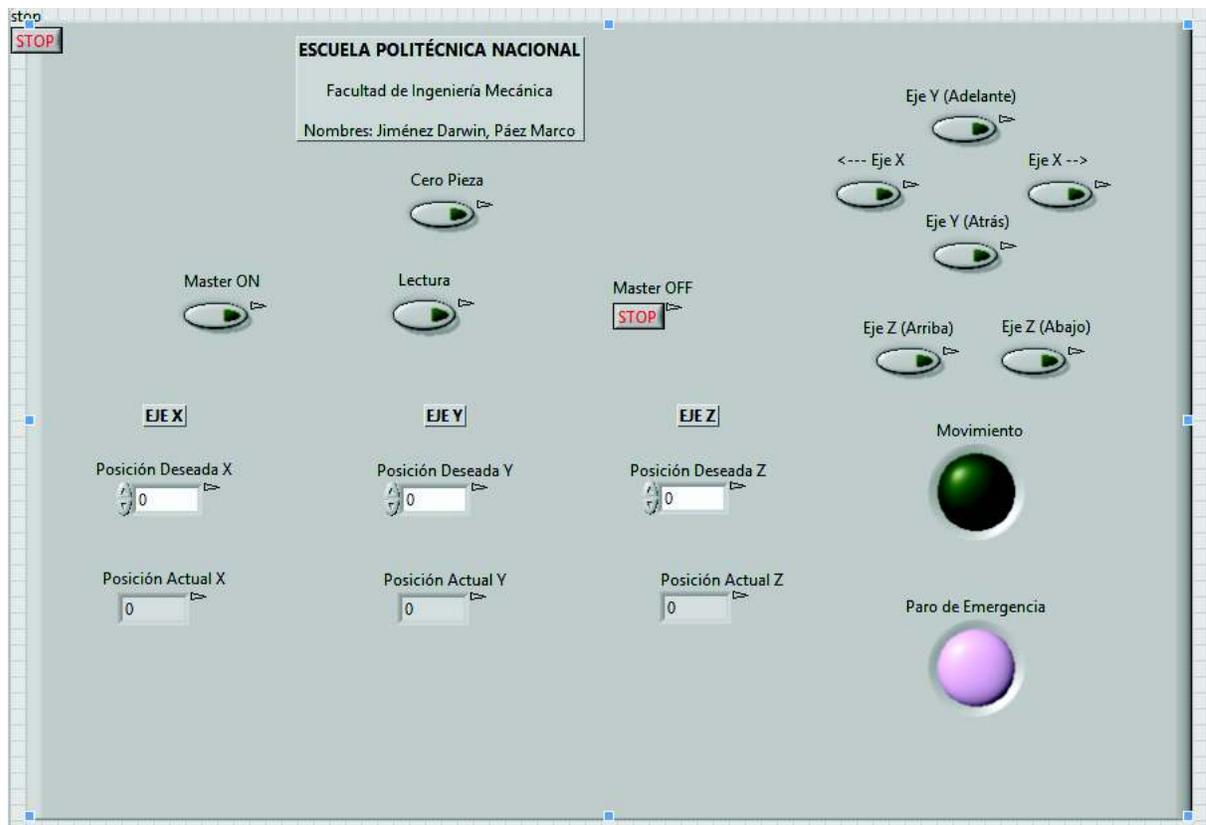


Figura 3.5. HMI LabVIEW para el prototipo
(Fuente: Propia)

3.1.5. Protocolo de Pruebas

Aquí se establece el protocolo para la realización de ensayos que permitan determinar el correcto funcionamiento los mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de una máquina CNC, por lo que se analiza los parámetros principales.

El protocolo de pruebas consiste en una serie de acciones predefinidas y encaminadas para asegurar la fiabilidad del diseño.

3.1.5.1. Nombre del Proceso: Prueba N°1

Objetivo: Verificar según las especificaciones técnicas (Planos) el paralelismo de los ejes guías.

Encargado de la Prueba: Operario.

Procedimiento:

- 1) Encender la máquina y el controlador del sistema.
- 2) Colocar un lápiz en la punta del husillo
- 3) Mover todos los carros a la posición inicial (Posición mínima: X=0[mm], Y=0[mm], Z=0[mm]).
- 4) Colocar papel de prueba en la mesa de trabajo.
- 5) Mover husillo a los siguientes puntos de forma secuencial. Tiene como objetivo dibujar una serie de líneas paralelas.

Tabla 3.6 Puntos de secuencia Prueba N° 1

	X	Y	Z
Punto 1	0	150	330
Punto 2	0	150	350
Punto 3	800	150	350
Punto 4	800	150	330
Punto 5	800	300	330
Punto 6	800	300	350
Punto 7	0	300	350
Punto 8	0	300	330
Punto 9	200	0	330
Punto 10	200	0	350
Punto 11	200	600	350
Punto 12	200	600	330
Punto 13	400	600	330
Punto 14	400	600	350
Punto 15	400	0	350

(Fuente: Propia)

- 6) Retirar el husillo a su posición inicial

- 7) Retirar papel de prueba.
- 8) Tomar las medidas de las líneas paralelas al inicio, en las intersecciones y al final del papel.
- 9) Calcular el error absoluto presente de cada medida (separación en Y: 150[mm] y en X: 200[mm]) y verificar que se encuentre dentro del rango de: ± 0.1 [mm].

Condiciones de aprobación:

- No más de una medición debe exceder el rango permitido en cada eje.
- Ninguna de las mediciones debe exceder la desviación de ± 0.2 [mm].

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA							
PROTOCOLO DE PRUEBAS Prueba N°1								
Datos Generales								
Equipo:	Mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de una máquina CNC Jiménez-Páez							
Revisado por:								
Supervisor:								
Lugar:								
Fecha:								
Toma de medidas								
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4				
Eje X								
Eje Y								
Cálculo del error absoluto								
1) Calcule los errores absolutos para cada medida y colocar en la casilla E.Abs. correspondiente 2) Marque con una X o un visto en la casilla de estado (Est.) según corresponda: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Si la desviación se encuentra entre ± 0.1 colocar visto. ▪ Si la desviación no se encuentra en el rango colocar una X. 								
	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4	
	E. Abs	Est.	E. Abs	Est.	E. Abs	Est.	E. Abs	Est.
Desviación X								
Desviación Y								
Aprobación								
<ul style="list-style-type: none"> ▪ No más de una medición debe exceder el rango permitido en cada eje. ▪ Ninguna de las mediciones debe exceder la desviación de ± 0.2 [mm]. 								
Eje/ Estado			Aprobado			Rechazado		
Eje X								
Eje Y								
_____ Firma Revisor					_____ Firma Supervisor			

3.1.5.2. Nombre del Proceso: Prueba N°2

Objetivo: Verificar en base a las especificaciones técnicas de la máquina la precisión en el posicionamiento de los ejes.

Encargado de la prueba: Operario.

Procedimiento:

- 1) Encender la máquina y el controlador del sistema.
- 2) Colocar un Lápiz en la punta del husillo.
- 3) Inicializar y encerrar la máquina.
- 4) Colocar el bloque de prueba (medidas del bloque: 150x150x50 [mm]) y una hoja sobre el mismo.
- 5) Ubicar el husillo en X: 350[mm], Y: 250[mm], Z: 290[mm].
- 6) Mover el husillo a los siguientes puntos de forma secuencial (Tabla 3.7) para poder obtener un cuadrado de 100x100 [mm].

Tabla 3.7. Puntos de secuencia Prueba N° 2

	X	Y	Z
Punto 1	350	250	300
Punto 2	450	250	300
Punto 3	450	350	300
Punto 4	350	350	300
Punto 1	350	250	300

(Fuente: Propia)

- 7) Retirar el husillo a su posición inicial
- 8) Retirar la hoja de prueba y colocar una nueva, repetir el proceso desde el paso 5 al paso 7 tres veces más.
- 9) Apagar la máquina y el controlador.
- 10) Calcular el error absoluto con respecto a un cuadrado de 100x100 [mm]
- 11) Verificar que el error absoluto en cada caso, se encuentre dentro del parámetro de precisión de ± 0.2 [mm].

Condiciones de aprobación:

- Todas las medidas deben encontrarse dentro de la precisión deseada de ± 0.2 [mm].
- Las líneas deben estar claras y rectas, en caso de no encontrarse claras o no presentarse debe ser un error en la calibración del eje Z y se debe calibrar todos los ejes nuevamente.
- Si las líneas se encuentran curvas se debe volver a calibrar todo el equipo.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**PROTOCOLO DE PRUEBAS
Prueba N°2**

Datos Generales

Equipo:	Mecanismos de posicionamiento y desplazamiento de la herramienta de una máquina CNC Jiménez-Páez
Revisado por:	
Supervisor:	
Lugar:	
Fecha:	

Toma de medidas

Línea/Medición	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4
Punto 1 al 2				
Punto 2 al 3				
Punto 3 al 4				
Punto 4 al 1				

Cálculo del error absoluto

- 1) Calcule los errores absolutos para cada medida y colocar en la casilla E.Abs. correspondiente
- 2) Marque con una X o un visto en la casilla de estado (Est.) según corresponda:
 - Si la desviación se encuentra entre ± 0.2 [mm] colocar visto.
 - Si la desviación no se encuentra en el rango colocar una X.

Desviación	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4	
	E.Abs	Est.	E.Abs	Est.	E.Abs	Est.	E.Abs	Est.
Punto 1 al 2								
Punto 2 al 3								
Punto 3 al 4								
Punto 4 al 1								

Aprobación

- Todas las medidas deben encontrarse dentro de la precisión deseada de ± 0.2 [mm].
- Las líneas deben estar claras y rectas, en caso de no encontrarse claras o no presentarse debe ser un error en la calibración del eje Z y se debe calibrar todos los ejes nuevamente.
- Si las líneas se encuentran curvas se debe volver a calibrar todo el equipo.

Eje/ Estado	Aprobado	Rechazado
Punto 1 al 2		
Punto 2 al 3		
Punto 3 al 4		
Punto 4 al 1		

<hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> Firma Revisor	<hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> Firma Supervisor
--	---

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se comprobó que los elementos obtenidos del diseño mecánico satisfacen los requerimientos técnicos siempre y cuando se trabaje bajo las condiciones para los cuales fueron diseñados.
- Las piezas a mecanizarse podrán tener unas dimensiones máximas de 250x250x100 y de un material con una dureza máxima similar al acero AISI 1018, en caso de superar el valor de dicha dureza, la máquina podrá verse sometida a esfuerzos que causen daños en su funcionamiento.
- Los mecanismos propuestos tendrán la precisión diseñada siempre y cuando se cumpla con los acabados superficiales y tolerancias geométricas, detalladas en los planos de conjunto y taller del ANEXO XVII. Tanto al momento de fabricación de los elementos, como en su montaje.
- La selección del paso del tornillo sin fin, la resolución de los servomotores y la deflexión ante esfuerzos (robustez) de los elementos juegan un papel fundamental en la precisión de posicionamiento de los mecanismos propuestos. Si alguna de las características anteriormente señaladas presentara algún tipo de holgura, fallo o deflexión inesperada; repercutirá en la precisión general de manera negativa
- El sistema de posicionamiento y desplazamiento de la máquina ha sido diseñado de tal manera que una gran cantidad de los materiales a usarse en su construcción puedan ser adquiridos dentro del mercado nacional y ser ensamblados por mano de obra ecuatoriana; siendo un gran incentivo para generar empleo en el país y promover el desarrollo de las metalmecánicas.
- Las simulaciones realizadas en SOLIDWORKS de los elementos críticos, tales como los ejes utilizados en el módulo de guía de movimiento, permitieron comprobar cálculos previos y verificar el correcto dimensionamiento de dichos elementos.
- Se logró diseñar el control automático de los sistemas de posicionamiento y desplazamiento en tres ejes, el cual es capaz de realizar la lectura de valores numéricos de posición deseada, interpretarlos en pulsos a darse a los servomotores y producir su movimiento.
- La simulación realizada en el software Step7 y PC_Simu indica el correcto funcionamiento de la programación ladder para el PLC Siemens S7 200,

presentando un cumplimiento de todas las tareas especificadas en el diseño del control automático.

- La elaboración de un prototipo funcional en el presente trabajo de titulación permite evidenciar que la construcción de los mecanismos propuestos en escala real es viable.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar el control de fuerza que regule el torque de los motores en función de la fuerza requerida de corte.
- Como trabajo futuro se debe incluir el diseño de sistemas auxiliares al diseño propuesto.
- Se recomienda un estudio sobre el diseño de la estructura de soporte del sistema CNC. Una bancada más robusta podría presentar un mejor comportamiento frente a las grandes fuerzas de corte, así como a vibraciones al momento de maquinar.
- Se recomienda realizar un programa que permita el paso de datos en código G a datos que pueda interpretar el PLC.
- Tener cuidado de no trabajar por encima de los rangos de movimientos del sistema CNC, a pesar de hacer usos de finales de carrera es importante no trabajar en rangos límites ya que cualquier tipo de choque podría provocar averías en la máquina.
- Al momento de construir el sistema CNC se recomienda tener gran precisión en el ensamblaje, ya que holguras o desalineación no deseadas jugarán un rol de manera negativa en la exactitud de máquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PROECUADOR, “Análisis Sector Metalmecánica | PRO ECUADOR,” Quito, p. 28, 2013.
- [2] Tusfinanzas, “Efectos de la caída del precio del petróleo en el Ecuador - Finanzas Personales Ecuador,” 2016. [Online]. Available: <https://tusfinanzas.ec/blog/2016/02/29/conoce-algunos-efectos-de-la-caida-del-precio-del-petroleo-en-el-ecuador/>. [Accessed: 27-Sep-2017].
- [3] S.-L. Jämsä-Jounela, “Future trends in process automation,” *Annu. Rev. Control*, vol. 31, no. 2, pp. 211–220, Jan. 2007.
- [4] J. E. Correa, N. Toombs, and P. M. Ferreira, “A modular-architecture controller for CNC systems based on open-source electronics,” *J. Manuf. Syst.*, 2017.
- [5] E. P. Moreno Zapata and D. A. Poma Ordóñez, *Diseño y simulación de un Router CNC para corte por plasma a partir de archivos DXF 2D* /. EPN, 2016.
- [6] M. A. Pérez Segura and J. A. Rosales Acosta, *Automatización e implementación de un sistema CNC para una fresadora vertical tipo torreta* /. 2015.
- [7] H. F. Guanoluisa Pilatásig and H. P. Sánchez Oquendo, “Diseño y construcción de una máquina fresadora CNC de 3 grados de libertad con un volumen de trabajo útil de 500 x 500 x 100 mm para tallar madera en alto y bajo relieve /,” 2013.
- [8] J. Valentino, “Introduction to computer numerical control (CNC),” 2003.
- [9] CNC Programming Tips, “LEARNING CNC STRATEGIES AND TIPS: Classification of CNC control systems,” 2015. [Online]. Available: <http://cnc-programming-tips.blogspot.com/2015/10/classification-of-cnc-control-systems.html>. [Accessed: 22-Nov-2017].
- [10] E. L. J. Bohez, “Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 4, pp. 505–520, 2002.
- [11] V. V. Athani, *A Stepper motors: fundamentals, applications and design*. New Age International Ltd, 1997.
- [12] F. Conti, “Motores Paso a Paso 1a ed,” pp. 1–33, 2005.
- [13] S. Jennings, “Motores Paso a Paso 1a ed,” pp. 1–33, 2005.
- [14] D. Samper and J. F. Abad, “Diseño y construcción de una máquina de control numérico con control en tiempo real mediante dispositivo apuntador,” p. 110, 2011.
- [15] J. Ospina, J, Londoño, “Módulo de entrenamiento para el control de posición y velocidad de servomotores usando el sistema Simotion,” vol. 1, no. Diciembre, 2011.
- [16] Quimel, “Servo brushless y sus componentes basicos,” 2015.
- [17] Yaskawa, “Rotary Servo Motors,” 2017. .
- [18] LogicbusS.A., “Que es un Encoder, funcionamiento y tipos,” 2015. .
- [19] J. López and Artés, “8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA DE LOS CODIFICADORES ÓPTICOS LINEALES DEBIDO A LA VIBRACIÓN.”

- [20] EncoderProducts, “¿Qué es un Encoder?,” 2017. .
- [21] Leslie Eduardo, “MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC) DE CUATRO EJES, CON COMUNICACIÓN USB, PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE GRABADO EN MADERA, PLÁSTICO Y MATERIALES NO CONVENCIONALES.” *Univ. Nac. Ing.*, p. 71, 2011.
- [22] C. Riba Romeva and Carles., *Diseño concurrente*. Edicions UPC, 2002.
- [23] SupraCNC, “Maquinaria CNC, Repotenciación, Automatización y Software,” 2017. .
- [24] ROMI, “Catálogo Línea Romi D,” 2017.
- [25] ROMI, “Especificaciones Línea Romi D,” 2017.
- [26] ROLAND, “Especificaciones de la MDX-40A SRP,” 2015. [Online]. Available: <https://www.rolanddga.com/es-la/productos/3d/mdx-40a-fresadora-sobremesa/specifications>. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [27] VIWA, “Centro mecanizado VCM3-M400AC,” vol. 1, no. 900, pp. 6–8, 2017.
- [28] BKB, “. : BKB MAQUINARIA INDUSTRIAL : .,” 2016. .
- [29] TRAVIS CNC, “Centro de Mecanizado de Pequeño porte MM-4 - Travis CNC,” 2016. [Online]. Available: <http://www.traviscnc.com/spa/p/product/product/productos/mm-4.htm>. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [30] HassF1Team, “Haas VF-2 | Haas Automation, Inc. | CNC Machine Tools,” 2017. .
- [31] TechDesign, “TechDesign - Automatización SCADA, PLCs CAD CAM CAE CNC,” 2017. .
- [32] J. Rodríguez, “DISEÑO DE MÁQUINA DE CORTE C.N.C CON 3 EJES,” UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2016.
- [33] STRATASYS solution, “GrabCAD.” [Online]. Available: <https://grabcad.com/>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [34] Carvajal Grupo, “Torno CNC de bancada inclinada SunMaster,” 2001. .
- [35] A. Brendel, *Arranque de virutas - Máquinas herramienta*, Primera Ed. Berlin: Institut für berufliche Entwicklung e.V., 2008.
- [36] J. Berridi, “Sistemas de amarre en el mundo del fresado,” 2003. .
- [37] ArtSoft_Mach, “Support Mach3.”
- [38] Allen Bradley, “Micrologix Support,” 2008.
- [39] B. J. Hamrock, B. O. Jacobson, and S. R. Schmid, *Elementos de máquinas*. McGraw-Hill, 2000.
- [40] J. M. Marín García, *Apuntes de diseño de máquinas*. Club Universitario, 2008.
- [41] L. Hall, *Diseño de Maquinas.*, McGraw Hil. 1980.
- [42] R. L. Mott and V. González y Pozo, *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson Prentice-Hall, 2006.
- [43] NOOK, “Conjunto de husillos de bolas de precisión métrica y en miniatura,” *Catálogo Nook*.
- [44] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley,” *Igarss*

- 2014, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [45] C. Sandvik, “Planeado general,” 2018. .
- [46] A. Lopez, E. Ortiz, and G. Padilla, “Diseño y manufactura de prototipo de fresadora vertical CNC,” Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [47] E. Oberg, F. Jones, and H. Horton, *Machinery’s Handbook 29th*, 29th ed. New York: Industrial Press, Inc., 2012.
- [48] SANDVIK Coromant, “Materials,” 2010.
- [49] L. Guangzhou Tecnr Technology Co, “Amazon.com: 3KW 220V Er20 Collet Air Cooled CNC Spindle Motor and 3kw 220v Vfd Variable Frequency Drive: Home Improvement.” .
- [50] American Welding Society, *AWS D1.1/D1.1M:2015 An American National Standard Structural Welding Code — Steel*. 2015.
- [51] ANSI and AF&PA, “Beam Design Formulas With Shear and Moment Diagrams,” *ANSI/AF&PA NDS*, 2005.
- [52] A. Vatankhah, “Shafts and Shaft Components,” 2015. [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/10403071/>. [Accessed: 03-Jul-2018].
- [53] M. Raza, “Model Steam Engine Assembly: Design and Analysis,” 2014. [Online]. Available: <http://www.supersonicengineer.com/steamenginepg3.html>. [Accessed: 03-Jul-2018].
- [54] SKF, “Carga dinámica equivalente del rodamiento, P,” 2015. .
- [55] THK, “Catálogo-Husillo de bolas.,” p. 474.
- [56] G. Bravo, “Diseño y simulación de máquina automatizada con PLC para dividir planchas de cartón de hasta 1300mm de ancho y 2200mm de longitud, mediante cortes longitudinales y transversales,” *Esc. Politécnica Nac.*, p. 510, 2012.
- [57] HepcoMotion, “BSP Husillos de bolas premier,” *Hepcomotion*, 2006.
- [58] OMRON, “Servo Motor Selection,” *Omron*, 2012.
- [59] OMRON, “OMNUC U-Series AC Servo Motors/Drivers (30-750-W Analog Inputs),” 2018.
- [60] M. Rutheravan, “SUMMARY OF SAFETY CRITERIA IN DESIGN,” *Univ. Malaysia Pahang*, no. July 2015, pp. 0–2, 2015.
- [61] S. S. Rao, *The finite element method in engineering*. .
- [62] AMES, “Fixed Beam Deflection and Stress Calculator,” 2014. [Online]. Available: <http://www.amesweb.info/StructuralBeamDeflection/FixedBeamDeflectionCalculator.aspx>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [63] SKF, “Selección de Rodamientos,” *SKF*, p. 1382.
- [64] BOSCH, “Rodamientos lineales BOSCH,” 2007.
- [65] SIEMENS, “Manual del Sistema de Automatización S7-200,” *Siemens AG*, p. 574, 2008.
- [66] EDU-XUNTA, “3.1.4.- Elementos de maniobra y control.,” 2010. [Online]. Available: <https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947843>

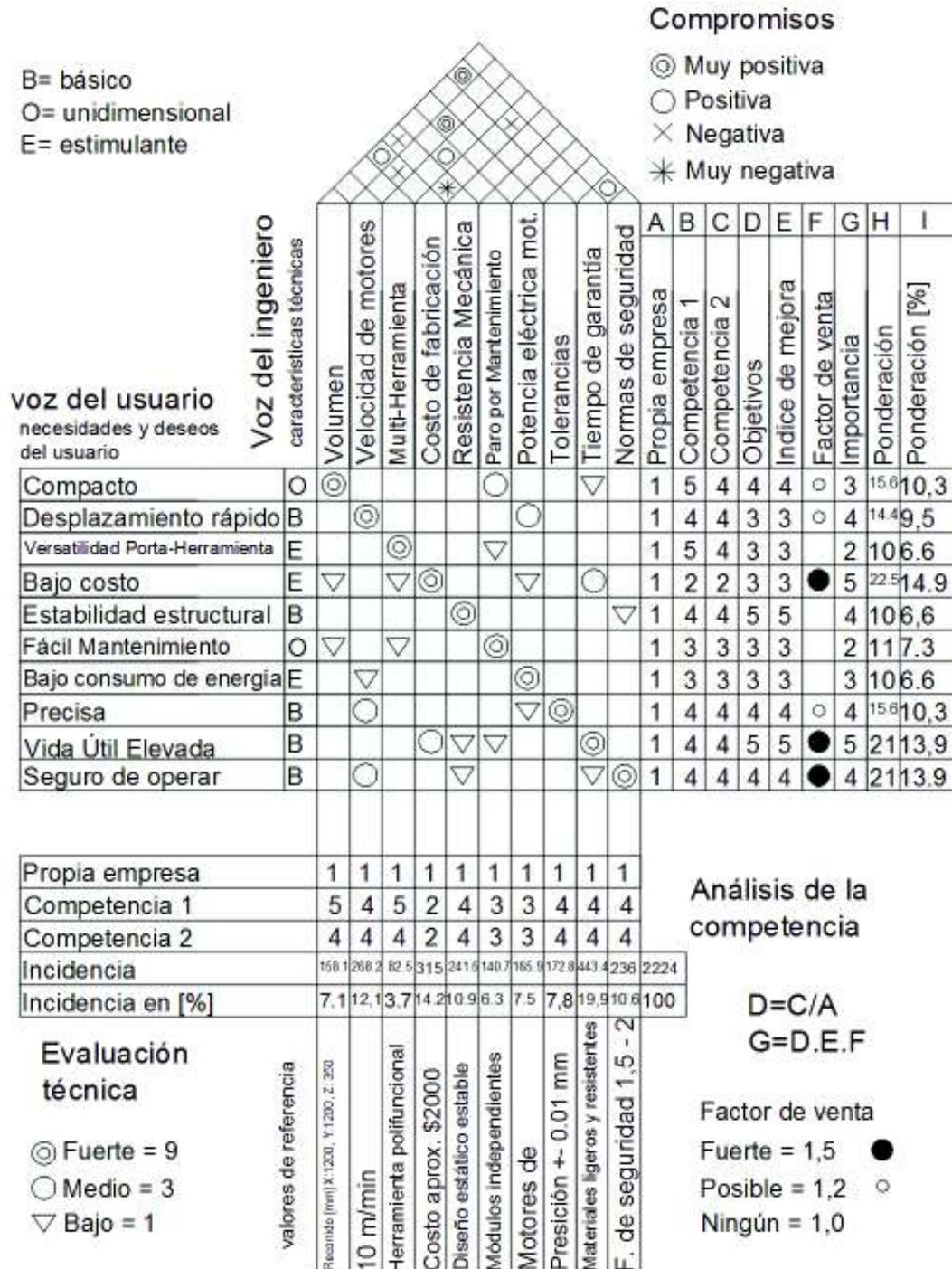
- /contido/314_elementos_de_manioobra_y_control.html. [Accessed: 25-Mar-2018].
- [67] SIRIUS-SIEMENS, "Industrial Controls," *Siemens AG*, 2015.
- [68] AUTONICS, "SENSORES FOTOLÉCTRICOS," 2008.
- [69] ACOMEE, "Sensor final de carrera," 2008.
- [70] OsiSens-Schneider, "Soluciones en detección - Catálogo," 2009.
- [71] MCBtec, "El encoder," pp. 1–5, 2008.
- [72] PR-ELECTRONICS, "Loop-powered LCD 5531A," 2016. [Online]. Available: <http://www.prelectronics.es/?altTemplate=showproduct&id=1738>. [Accessed: 04-Apr-2018].
- [73] Omron Europa, "Servomotores rotativos Omron," 2018. .
- [74] SIMATIC-SIEMENS, "Display de texto TD17," 2007.
- [75] S. Gallardo Vázquez, *Técnicas y procesos en instalaciones domóticas y automáticas : Electricidad-electrónica : [Sistemas electrotécnicos y automatizados]*. Paraninfo, 2013.
- [76] ROCATEK.S.A, "Programacion Ladder Basica - PLC Allen Bradley," 2012. .
- [77] EPN FIEE, "Recopilación de información del Controlador lógico programable," 2010.
- [78] IPAC Duferco Group, "CATALOGO IPAC :: Productos y Servicios ::," 2018. [Online]. Available: http://www.ipac-acero.com/revista-digital/IPAC_catalogo.html. [Accessed: 21-May-2018].
- [79] CNC Insumos, "Perfil Aluminio Para Mesa Ranurada De Maquina Cnc Clamps Etc \$ 850.0 - CNC INSUMOS," 2017. [Online]. Available: <https://cncinsumos.mercadoshops.com.ar/perfil-aluminio-para-mesa-ranurada-de-maquina-cnc-clamps-etc-209xJM>. [Accessed: 21-May-2018].
- [80] IMPORT ACEROS, "Import Aceros - SOMOS IMPORTADORES Y DISTRIBUIDORES DIRECTOS," 2018. [Online]. Available: <http://www.importaceros.com/#productos>. [Accessed: 21-May-2018].
- [81] Ministerio del Trabajo, "Biblioteca – Salarios mínimos Sectoriales 2018," 2018. [Online]. Available: <http://www.trabajo.gob.ec/biblioteca/>. [Accessed: 19-Jun-2018].
- [82] CEDITOOLS'S, "Rodamiento Lineal Lm25uu - U\$S 19,99 en Mercado Libre," 2017. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-415076690-rodamiento-lineal-lm25uu-_JM. [Accessed: 22-May-2018].
- [83] SKF, "Rodamientos rígidos de bolas - 61901," 2017. [Online]. Available: <http://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=61901>. [Accessed: 22-May-2018].
- [84] IMPORPERNOS, "Pernos - Tuercas - Rodelas," 2017. [Online]. Available: <http://www.imporpernos.com/pernos>. [Accessed: 22-May-2018].
- [85] TEN-HIGH, "TEN-HIGH Ball screw CNC parts SFU," 2018. [Online]. Available: https://www.amazon.com/TEN-HIGH-SFU1605-RM1605-Deflector-15-75inch/dp/B078MWT32F/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1526313770&sr=8-1&keywords=husillo+de+bolas. [Accessed: 22-May-2018].

- [86] RATMMOTOR, "Ballscrew End Supports RM BK," 2018. [Online]. Available: https://www.amazon.com/Ballscrew-Supports-BF12-Floated-SFU1605/dp/B077P3VHZC/ref=sr_1_1_sspa?ie=UTF8&qid=1526314957&sr=8-1-spons&keywords=ball+screw+end+supports&psc=1. [Accessed: 22-May-2018].
- [87] NBK, "Couplings | NBK | The Motion Control Components," 2017. [Online]. Available: <https://www.nbk1560.com/en-US/products/coupling/couplicon/>. [Accessed: 22-May-2018].
- [88] TECNR, "3kw 220 V fresco aire husillo er20 fresado CNC motor husillo de la máquina de spindle," 2017. [Online]. Available: https://es.aliexpress.com/store/product/4pcs-Ceramic-Bearings-3kw-220v-air-cool-spindle-ER20-cnc-milling-machine-spindle-motor/1424168_32827033134.html?spm=a219c.search0104.3.7.2c7cf254lmRKLB&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_3_10065_10068_10344_103. [Accessed: 22-May-2018].
- [89] Sandvik, "Sandvik Coromant 415 - 025 A20 - 07H coromill 415 cara cortador de fresado: Amazon.es: Industria, empresas y ciencia," 2017. [Online]. Available: https://www.amazon.es/Sandvik-Coromant-coromill-415-cara-cortador/dp/B073FXP42S/ref=sr_1_5?s=industrial&ie=UTF8&qid=1526312538&sr=1-5&keywords=coromill. [Accessed: 22-May-2018].
- [90] Comercial-Jarramillo, "Electrodo C-13 E 7018 De 1/8 3.25 Mm Kgs/ 5kg/ 100778." [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-415313418-electrodo-aga-c-13-e-6011-de-18-325-mm-kgs-5kg-100778-_JM. [Accessed: 22-May-2018].
- [91] Electric Automation, "OMRON - Electric Automation Network," 2017. [Online]. Available: <https://www.electricalautomationnetwork.com/es/omron>. [Accessed: 22-May-2018].
- [92] Classic Automation, "6ES7214-2BD23-0XB0 | CPU 224XP Compact Unit," 2015. [Online]. Available: <https://www.classicautomation.com/Part/6es7214-2bd23-0xb0>. [Accessed: 22-May-2018].
- [93] Siemens, "Lista de Precios Productos Eléctricos Industriales," *Siemens AG*, p. 192, 2017.
- [94] Park Electrical Services, "PR Electronics Loop Powered LCD Indicator 5531A," 2017. [Online]. Available: <https://www.parkelect.co.uk/PR-Electronics-Loop-Powered-LCD-Indicator-5531A>. [Accessed: 22-May-2018].
- [95] Allen Bradley, "Micrologix Programmable Controllers," 2012.
- [96] F. P. Beer, "Mechanics of Materials," p. A13, 2012.

ANEXOS

ANEXO I. Casa de la calidad

En la casa de la calidad se asocia los requerimientos del cliente con las características técnicas, y los correlaciona entre sí, para analizar con respecto a la competencia para así mejorar o crear un nuevo producto que satisfaga ambas partes y pueda competir o sobrepasar a la competencia.



ANEXO II. Factores de alimentación, C, para constantes de poder.

Unidades Inglesas				Unidades SI			
Avance in. ^a	C	Avance in. ^a	C	Avance mm. ^b	C	Avance mm. ^b	C
0,001	1,60	0,01	0,97	0,02	1,70	0,35	0,97
0,002	1,40	0,02	0,96	0,05	1,40	0,38	0,95
0,003	1,30	0,02	0,94	0,07	1,30	0,40	0,94
0,004	1,25	0,02	0,92	0,10	1,25	0,45	0,92
0,005	1,19	0,02	0,90	0,12	1,20	0,50	0,90
0,006	1,15	0,02	0,88	0,15	1,15	0,55	0,88
0,007	1,11	0,03	0,86	0,18	1,11	0,60	0,87
0,008	1,08	0,03	0,84	0,20	1,08	0,70	0,84
0,009	1,06	0,03	0,83	0,22	1,03	0,75	0,83
0,010	1,04	0,03	0,82	0,25	1,04	0,80	0,82
0,011	1,02	0,04	0,80	0,28	1,01	0,90	0,80
0,012	1,00	0,04	0,78	0,30	1,00	1,00	0,78
0,013	0,98	0,06	0,72	0,33	0,98	1,50	0,72

^a Torneado, in/rev; fresado, in/diente; cepillado y limado in/carrera; rectificado in/diente.

^b Torneado, mm/rev; fresado, mm/diente; cepillado y limado mm/carrera; rectificado mm/diente.

(Fuente: [47])

ANEXO III. Propiedades típicas de materiales usados en Ingeniería (Unidades internacionales)

Material	Density kg/m ³	Ultimate Strength			Yield Strength ²		Modulus of Elasticity, GPa	Modulus of Rigidity, GPa	Coefficient of Thermal Expansion, 10 ⁻⁶ /°C	Ductility, Percent Elongation in 50 mm
		Tension, MPa	Compression, ² MPa	Shear, MPa	Tension, MPa	Shear, MPa				
Steel										
Structural (ASTM-A36)	7860	400			250	145	200	77.2	11.7	21
High-strength-low-alloy										
ASTM-A709 Grado 345	7860	450			345		200	77.2	11.7	21
ASTM-A913 Grado 450	7860	550			450		200	77.2	11.7	17
ASTM-A992 Grado 345	7860	450			345		200	77.2	11.7	21
Quenched & tempered										
ASTM-A709 Grado 600	7860	760			690		200	77.2	11.7	18
Stainless, AISI 302										
Cold-rolled	7920	860			520		190	75	17.3	12
Annealed	7920	685			260	150	190	75	17.3	50
Reinforcing Steel										
Medium strength	7860	480			275		200	77	11.7	
High strength	7860	620			415		200	77	11.7	
Cast Iron										
Gray Cast Iron 4.5% C, ASTM A-48	7200	170	685	240			60	26	12.1	0.5
Malleable Cast Iron 2% C, 1% Si, ASTM A-47	7300	345	620	330	230		165	68	12.1	10
Aluminum										
Alloy 1100-H14 (99% Al)	2710	110		70	95	55	70	26	23.6	9
Alloy 2014-T6	2800	455		275	400	230	75	27	23.0	13
Alloy-2024-T4	2800	470		290	325		73		23.2	19
Alloy-5456-H116	2630	315		195	230	130	72		23.9	16
Alloy 6061-T6	2710	260		165	240	140	70	26	23.6	17
Alloy 7075-T6	2800	570		330	500		72	28	23.6	11
Copper										
Oxygen-free copper (99.9% Cu)										
Annealed	8910	220		150	70		120	44	16.9	45
Hard-drawn	8910	390		200	265		120	44	16.9	4
Yellow-Brass (60% Cu, 38% Zn)										
Cold-rolled	8470	510		300	410	250	105	38	20.9	5
Annealed	8470	320		220	100	60	105	38	20.9	65
Red Brass (80% Cu, 18% Zn)										
Cold-rolled	8740	565		320	435		120	44	18.7	3
Annealed	8740	270		210	70		120	44	18.7	45
Tin bronze (85 Cu, 8Sn, 4Zn)	8800	310			145		95		18.0	30
Manganese bronze (63 Cu, 25 Zn, 6 Al, 3 Mn, 3 Fe)	8360	685			330		105		21.6	20
Aluminum bronze (81 Cu, 4 Ni, 4 Fe, 11 Al)	8330	620	900		275		110	42	16.2	5

(Fuente: [96])

ANEXO IV. Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD).

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

(Fuente: [44])

ANEXO V. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin

Acabado Superficial	Factor a		Exponente b
	S _{ut} , kpsi	S _{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frio	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	-0.995

(Fuente:[44])

ANEXO VI. Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
35	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1000	0.698
550	0.672	1100	0.567
600	0.549		

(Fuente:[44])

ANEXO VII. Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga

Confiabilidad %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

(Fuente:[44])

ANEXO VIII. Valores típicos de factores de seguridad basados en cálculos de esfuerzo.

Reliable materials under controlled conditions subjected to loads and stresses known with certainty	1.2 - 1.5
Well-known materials under reasonably constant conditions subjected to known loads and stresses	1.5 - 2.0
Average materials subjected to known loads and stresses	2.0 - 2.5
Less well-known materials under average conditions of load, stress and environment	2.5 - 3.0
Untried materials under average conditions of load, stress and environment	3.0 - 4.0
Well-known materials under uncertain conditions of load, stress and environment	3.0 - 4.0

(Fuente: [52])

ANEXO IX. Tabla de esfuerzo de Von-Mises, factor de seguridad y deflexión permisibles en un motor de vapor.

	Max Von Mises Stress [psi]	Von Mises Stress [psi] @ Fig 1 Pt. A	Max Displacement [µin]	Min Factor of Safety	Part Material
Pressure Vessel	1285	--	21.91	27	Bronze
Piston	4095	--	67.5	1.953	6061 Alum
Piston Rod	6757	--	503.3	4.735	Plain Carbon Steel
Clevis	11260	--	307.7	2.85	Plain Carbon Steel
Clevis Pin	35910	6926	86.03	2.506	Alloy Steel
Connecting Rod	5776	--	223.8	5.539	Plain Carbon Steel
Counterweight/Crank	8391	--	262.9	3.813	Plain Carbon Steel
PV WALL #1 (END)	6018	--	20.3	5.316	Plain Carbon Steel
PV WALL #2 (Piston Rod End)	5331	--	20.06	6.001	Plain Carbon Steel
Driveshaft	81280	--	0.01176 (inch)	1.107	Alloy Steel

(Fuente: [53])

ANEXO X. Precisión del ángulo de paso

Tabla1 Precisión del ángulo de paso (valor admisible)

Unidad: μm

Niveles de precisión		Husillo de bolas de precisión										Husillo de bolas laminado		
		C0		C1		C2		C3		C5		C7	C8	C10
Longitud de rosca efectiva		Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido	Error de distancia de recorrido	Error de distancia de recorrido
Por encima	0 menos													
—	100	3	3	3,5	5	5	7	8	8	18	18	$\pm 50/$ 300 mm	$\pm 100/$ 300 mm	$\pm 210/$ 300 mm
100	200	3,5	3	4,5	5	7	7	10	8	20	18			
200	315	4	3,5	6	5	8	7	12	8	23	18			
315	400	5	3,5	7	5	9	7	13	10	25	20			
400	500	6	4	8	5	10	7	15	10	27	20			
500	630	6	4	9	6	11	8	16	12	30	23			
630	800	7	5	10	7	13	9	18	13	35	25			
800	1000	8	6	11	8	15	10	21	15	40	27			
1000	1250	9	6	13	9	18	11	24	16	46	30			
1250	1600	11	7	15	10	21	13	29	18	54	35			
1600	2000	—	—	18	11	25	15	35	21	65	40			
2000	2500	—	—	22	13	30	18	41	24	77	46			
2500	3150	—	—	26	15	36	21	50	29	93	54			
3150	4000	—	—	30	18	44	25	60	35	115	65			
4000	5000	—	—	—	—	52	30	72	41	140	77			
5000	6300	—	—	—	—	65	36	90	50	170	93			
6300	8000	—	—	—	—	—	—	110	60	210	115			
8000	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	260	140			

Nota) Unidad de longitud de rosca efectiva: mm

(Fuente: [55])

ANEXO XI. Diámetro de eje husillo en función de Longitud y paso

Diámetro exterior del eje del husillo	Longitud total del eje del husillo		
	C7	C8	C10
6 a 8	320	320	—
10 a 12	500	1000	—
14 a 15	1500	1500	1500
16 a 18	1500	1800	1800
20	2000	2200	2200
25	2000	3000	3000
28	3000	3000	3000
30	3000	3000	4000
32 a 36	3000	4000	4000
40	3000	5000	5000
45	3000	5500	5500
50	3000	6000	6000

(Fuente: [55])

Tabla20 Combinaciones estándar de eje de tornillo y paso (husillo de bolas laminado)

Unidad: mm

Diámetro exterior del eje del husillo	Paso																			
	1	2	4	5	6	8	10	12	16	20	24	25	30	32	36	40	50	60	80	100
6	●																			
8		●																		
10		●			○															
12		●				○														
14			●	●																
15							●		●			●								
16				●				●												
18						●														
20				●			●		●							●				
25				●			●					●					●			
28					●															
30																		●		
32							●							●						
36							●		●	●					●					
40							●									●			●	
45								●												
50									●								●			●

●: normalizado en almacén
○: seminormalizado en almacén

(Fuente: [55])

ANEXO XII. Posibles modelos de husillo de bolas tipo BTK

Descripción del modelo	Diámetro exterior del eje del husillo d	Paso de la bola centro a centro dp	Diámetro de la bola centro a centro de rosca dc	Cantidad de circuitos cargados	Capacidad de carga básica		Rigidez K	Dimensiones de la tuerca		Juego axial	Longitud estándar del eje	Momento de inercia del eje de husillo mm ⁴	Masa de la tuerca kg										
					Ca	C _a		B _t	PCD					d _t	Tw	Orificio de engrasado							
		Ph		H ₁	N ₁	N ₂	N ₁																
BTK 1008V-2,6	10	6	10,5	7,8	1X2,65	2,8	4,9	88	26	42	36	8	28	34	4,5	29	—	3	0,05	200, 300, 500, 1000	7,71X10 ⁴	0,12	0,48
BTK 1208V-2,6	12	8	12,85	9,7	1X2,65	3,8	6,8	108	29	45	44	8	36	37	4,5	32	—	3	0,05	200, 300, 500, 1000	1,6X10 ⁴	0,18	0,72
BTK 1404V-3,6	14	4	14,4	11,5	1X3,65	5,5	11,5	150	31	50	40	10	30	40	4,5	37	5	M6	0,1	500, 1000	2,96X10 ⁴	0,23	1
BTK 1405V-2,6	14	5	14,5	11,2	1X2,65	5	11,4	116	32	50	40	10	30	40	4,5	38	5	M6	0,1	500, 1000	2,96X10 ⁴	0,22	0,99
BTK 1605V-2,6	16	5	16,75	13,5	1X2,65	5,4	13,3	130	34	54	40	10	30	44	4,5	40	5	M6	0,1	500, 1000, 1500	5,05X10 ⁴	0,24	1,34
BTK 1808V-3,6	18	8	19,3	14,4	1X3,65	13,1	31	210	50	80	61	12	49	65	6,6	60	5	M6	0,1	500, 1000, 1500	8,09X10 ⁴	0,84	1,71
BTK 2005V-2,6	20	5	20,5	17,2	1X2,65	6	16,5	150	40	60	40	10	30	50	4,5	46	5	M6	0,1	500, 1000, 1500, 2000	1,23X10 ³	0,32	2,15
BTK 2010V-2,6	20	10	21,25	16,4	1X2,65	10,6	25,1	160	52	82	61	12	49	67	6,6	64	5	M6	0,1	500, 1000, 1500, 2000	1,23X10 ³	0,93	2,16
BTK 2505V-2,6	25	5	25,5	22,2	1X2,65	6,7	20,8	180	43	67	40	10	30	55	5,5	50	5	M6	0,1	500, 1000, 1500, 2000	3,01X10 ³	0,34	3,45
BTK 2510V-5,3	25	10	26,8	20,2	2X2,65	31,2	83,7	400	60	96	98	15	83	78	9	72	5	M6	0,1	500, 1000, 1500, 2000	3,01X10 ³	1,83	3,26
BTK 2808V-2,6	28	6	28,5	25,2	1X2,65	7	23,4	200	50	80	47	12	35	65	6,6	60	6	M6	0,1	500, 1000, 2000, 2500	4,74X10 ³	0,59	4,44
BTK 2808V-5,3	28	6	28,5	25,2	2X2,65	12,8	46,8	390	50	80	65	12	53	65	6,6	60	6	M6	0,1	500, 1000, 2000, 2500	4,74X10 ³	0,75	4,44
BTK 3210V-2,6	32	10	33,75	27,2	1X2,65	19,8	53,8	250	67	103	68	15	53	85	9	78	5	M6	0,14	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000	8,08X10 ³	1,56	5,49
BTK 3210V-5,3	32	10	33,75	27,2	2X2,65	36	107,5	490	67	103	98	15	83	85	9	78	5	M6	0,14	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000	8,08X10 ³	2,1	5,49
BTK 3610V-2,6	36	10	37	30,5	1X2,65	20,8	59,8	270	70	110	70	17	53	90	11	82	7	M6	0,17	500, 1000, 2000, 2500, 3000	1,29X10 ²	1,78	6,91
BTK 3610V-5,3	36	10	37	30,5	2X2,65	37,8	118,7	530	70	110	100	17	83	90	11	82	7	M6	0,17	500, 1000, 2000, 2500, 3000	1,29X10 ²	2,35	6,91
BTK 4010V-5,3	40	10	41,75	35,2	2X2,65	40,3	134,9	590	76	116	100	17	83	96	11	88	7	M6	0,17	1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500	1,97X10 ²	2,6	8,81
BTK 4512V-5,3	45	12	46,5	39,2	2X2,65	49,5	169	650	82	128	118	20	98	104	14	94	8	M6	0,17	1000, 1500, 2000, 3000, 3500, 4000	3,16X10 ²	3,48	11,08
BTK 5016V-5,3	50	16	52,7	42,9	2X2,65	93,8	315,2	930	102	162	145	25	120	132	18	104	12,5	R1/8 (PT1/8)	0,2	1000, 1500, 2000, 3000, 3500, 4000	4,82X10 ²	6,52	13,66

Nota) La longitud total de la tuerca aumentará cuando se equipare el dispositivo de lubricación QZ. Consulte **15-344** para obtener más detalles.

Código del modelo

BTK1405V-2,6 ZZ +500L C7 T H1K



(Fuente: [55])

ANEXO XIII. Velocidad de rotación admisible determinada por el valor DN.

Precisión	Jaula de bolas	Paso largo	Modelo SBK (SBK3636, SBK4040 y SBK5050)	$N_2 = \frac{210000}{D}$ (8-1)
			Modelo SBK (Para casos distintos de los números de modelo anteriores y el modelo SBK*de tipo pequeño)	$N_2 = \frac{160000}{D}$ (8-2)
		Paso estándar	Modelo SBN-V (medio)	$N_2 = \frac{160000}{D}$ (9-1)
			Modelos SBN-V (pequeño), HBN y SBKH	$N_2 = \frac{130000}{D}$ (9-2)
	Bola completa con accesorios	Paso superior	Modelo WHF	$N_2 = \frac{120000}{D}$ (10-1)
			Modelo WGF	$N_2 = \frac{70000}{D}$ (10-2)
		Paso largo	Modelos BLW, BLK, BLR, BNS y NS	$N_2 = \frac{70000}{D}$ (11)
		Paso estándar	Modelos BIF-V (medio), BNFN-V (medio) y BNF (medio)	$N_2 = \frac{130000}{D}$ (12-1)
			Modelos BIF-V (pequeño), BNFN-V (pequeño) y BNF (pequeño)	$N_2 = \frac{100000}{D}$ (12-2)
			Modelos BIF, DIK, BNFN, DKN, BNF, BNT, DK, MDK, MBF, BNK y DIR	$N_2 = \frac{70000}{D}$ (12-3)
Bola completa con accesorios (que cumplen con los estándares DN)	Paso estándar	Modelos EBA, EBB, EBC, EPA, EPB y EPC	$N_2 = \frac{100000}{D}$ (12-4)	
Laminado	Bola completa con accesorios	Paso superior	Modelo WHF	$N_2 = \frac{100000}{D}$ (13-1)
			Modelos WTF y CNF	$N_2 = \frac{70000}{D}$ (13-2)
		Paso largo	Modelos BLK y BLR	$N_2 = \frac{70000}{D}$ (14)
		Paso estándar	Modelo BTK-V	$N_2 = \frac{100000}{D}$ (15-1)
	Modelos JPF, BNT y MTF		$N_2 = \frac{50000}{D}$ (15-2)	

N_2 : Velocidad de rotación admisible determinada por el valor de DN ($\text{min}^{-1}(\text{rpm})$)

D : Diámetro de bola centro a centro

(se indica en las tablas de especificación del código de modelo respectivo)

De la velocidad de rotación admisible determinada por la velocidad peligrosa (N_1) y la velocidad de rotación admisible determinada por el valor de DN (N_2), la velocidad de rotación inferior se considera la velocidad de rotación admisible.

(Fuente: [55])

ANEXO XIV. Vida útil específica para diferentes tipos de máquinas

Tabla 9

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
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Máquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

(Fuente: [63])

ANEXO XV. Simulación estática de estructura de soporte.



Descripción

No hay datos

Simulación de Sólido

Fecha: domingo, 3 de junio de 2018

Diseñador: Solidworks

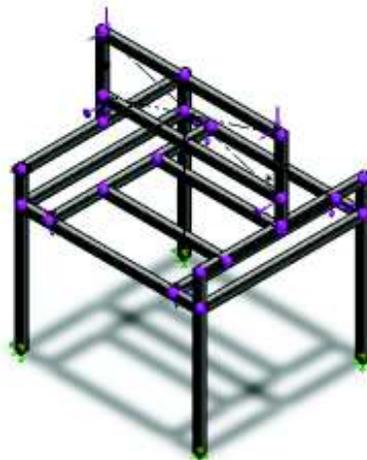
Nombre de estudio: Análisis estático 1

Tipo de análisis: Análisis estático

Tabla de contenidos

Índice de figuras	xiii
Índice de tablas.....	xvii
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos	1
1. MARCO TEÓRICO	2
2. METODOLOGÍA.....	11
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	166
4. CONCLUSIONES	Y
RECOMENDACIONES.....	178
Anexos	185

INFORMACIÓN TÉCNICA



Nombre del modelo: Simu
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos de viga:

Nombre de documento y referencia	Formulación	Propiedades	Ruta al documento/Fecha de modificación
Viga-1(Cortar-Extruir1[2]) 	Viga – Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in ² Longitud:476.82mm Volumen:0.000245413m ³ Densidad:7850kg/m ³ Masa:1.92649kg Peso:18.8796N	C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeY\Cuadro.SLDPRT Jun 03 11:12:26 2018
Viga-2(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(2)[2]) 	Viga – Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in ² Longitud:1150mm Volumen:0.000610111m ³ Densidad:7850kg/m ³ Masa:4.78937kg Peso:46.9358N	C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeY\Cuadro.SLDPRT Jun 03 11:12:26 2018
Viga-3(Recortar/Extender1) 	Viga – Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in ² Longitud:1100mm Volumen:0.000583574m ³ Densidad:7850kg/m ³ Masa:4.58106kg Peso:44.8944N	C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeY\Cuadro.SLDPRT Jun 03 11:12:26 2018
Viga-4(Cortar-Extruir1[1]) 	Viga – Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in ² Longitud:476.82mm Volumen:0.000245409m ³ Densidad:7850kg/m ³ Masa:1.92646kg Peso:18.8793N	C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeY\Cuadro.SLDPRT Jun 03 11:12:26 2018

<p>Viga-5(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[11])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:998mm Volumen:0.000529461m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.15627kg Peso:40.7314N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-6(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[5])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1048mm Volumen:0.000555996m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.36457kg Peso:42.7728N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-7(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[9])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1100mm Volumen:0.000583574m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.58106kg Peso:44.8944N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-8(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[3])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1000mm Volumen:0.00053053m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.16466kg Peso:40.8137N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-9(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[8])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:998mm Volumen:0.000529461m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.15627kg Peso:40.7314N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-10(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[12])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:998mm Volumen:0.000529461m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.15627kg Peso:40.7314N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-11(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[13])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:750mm Volumen:0.000397892m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:3.12345kg Peso:30.6098N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDPRT Jun 03 11:11:22 2018</p>

<p>Viga-12(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[6])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1000mm Volumen:0.00053053m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.16466kg Peso:40.8137N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-13(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[1])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1000mm Volumen:0.000530523m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.1646kg Peso:40.8131N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-14(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[4])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1000mm Volumen:0.000530523m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.1646kg Peso:40.8131N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-15(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[10])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:998mm Volumen:0.000529461m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.15627kg Peso:40.7314N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-16(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[2])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1048mm Volumen:0.000555996m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.36457kg Peso:42.7728N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-17(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[7])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:1100mm Volumen:0.000583574m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:4.58106kg Peso:44.8944N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>
<p>Viga-18(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[14])</p> 	<p>Viga – Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/square tube/40 x 40 x 4 Área de sección: 530.522in² Longitud:750mm Volumen:0.000397892m³ Densidad:7850kg/m³ Masa:3.12345kg Peso:30.6098N</p>	<p>C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\EjeX\Estructura.SLDprt Jun 03 11:11:22 2018</p>

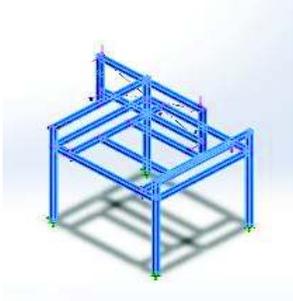
Propiedades de estudio

Nombre de estudio	Análisis estático 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla de viga
Tipo de solver	Direct sparse solver
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\user 2\Documents\Tesis\CAD\CAD Final - Simu\Nueva carpeta)

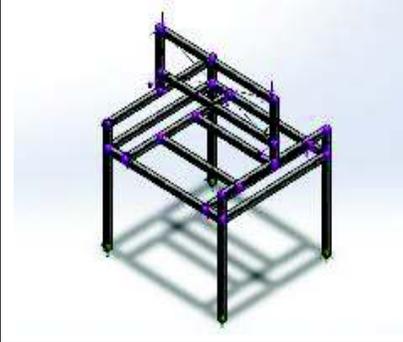
Unidades

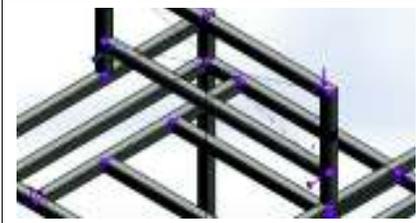
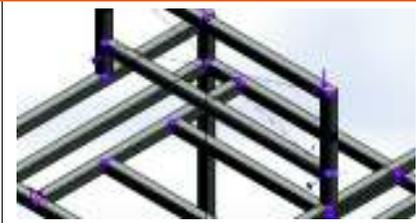
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

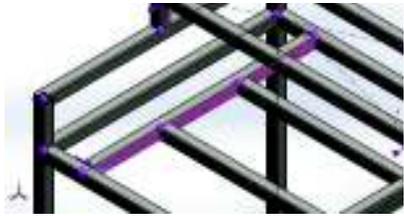
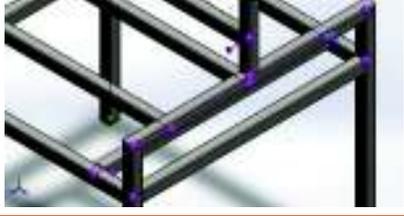
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: ASTM A36 Acero Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 2.5e+008 N/m² Límite de tracción: 4e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.26 Densidad: 7850 kg/m³ Módulo cortante: 7.93e+010 N/m²</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir1[2])(Cuadro-1), Sólido 2(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(2)[2])(Cuadro-1), Sólido 3(Recortar/Extender1)(Cuadro-1), Sólido 4(Cortar-Extruir1[1])(Cuadro-1), Sólido 1(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[11])(Estructura-1), Sólido 2(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[5])(Estructura-1), Sólido 3(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[9])(Estructura-1), Sólido 4(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[3])(Estructura-1), Sólido 5(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[8])(Estructura-1), Sólido 6(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[12])(Estructura-1), Sólido 7(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[13])(Estructura-1), Sólido 8(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[6])(Estructura-1), Sólido 9(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[1])(Estructura-1), Sólido 10(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[4])(Estructura-1), Sólido 11(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[10])(Estructura-1), Sólido 12(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[2])(Estructura-1), Sólido 13(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[7])(Estructura-1), Sólido 14(Tubo cuadrado 40 X 40 X 4(1)[14])(Estructura-1)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		Entidades: 4 Joint(s) Tipo: Geometría fija

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 1921.69 N Momentos: 214.1, ---, --- N.m
Fuerza-2		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 1582.9 N Momentos: 322.27, ---, --- N.m
Fuerza-3		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 1921.69 N Momentos: ---, 214.1, --- N.m
Fuerza-4		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 1582.9 N Momentos: ---, 322.27, --- N.m
Fuerza-5		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 524.59 N Momentos: ---, ---, --- N.m

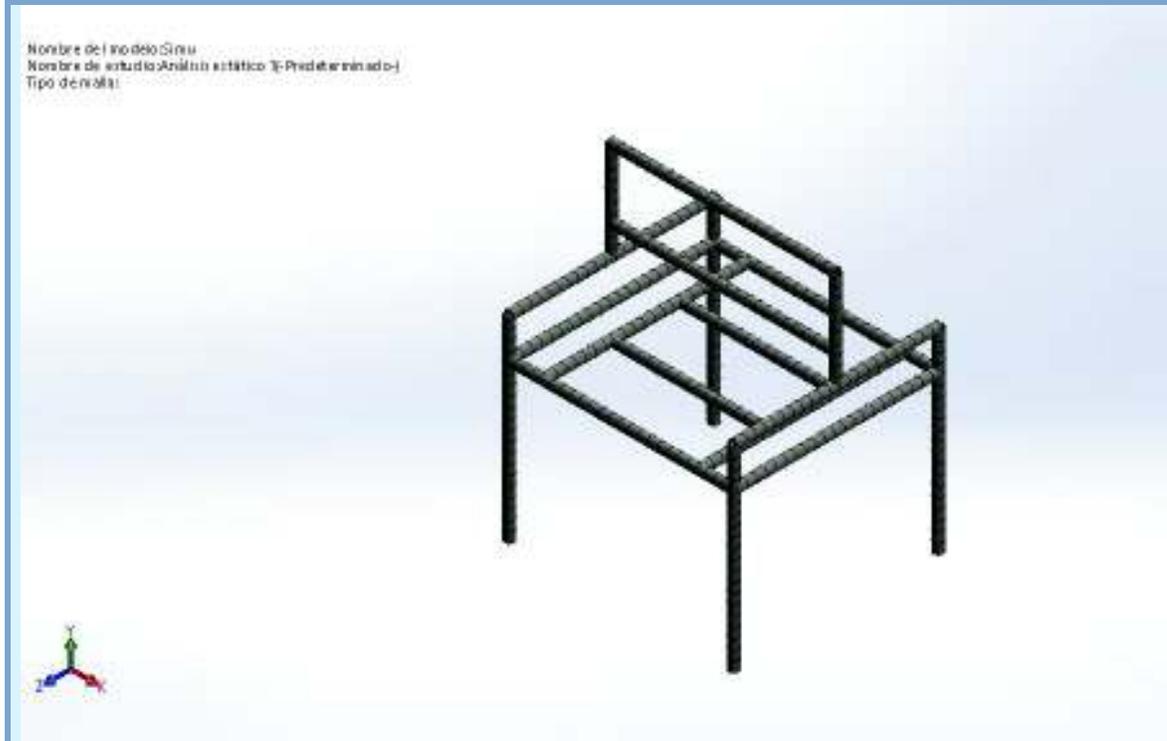
Fuerza-6		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 524 N Momentos: ---, ---, --- N.m
Fuerza-7		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 550.8 N Momentos: ---, ---, --- N.m
Fuerza-8		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 550.8 N Momentos: ---, ---, --- N.m
Fuerza-9		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 92.9 N Momentos: ---, 109, --- N.m
Fuerza-10		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 92.9 N Momentos: ---, 109, --- N.m
Fuerza-11		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 88.5 N Momentos: ---, 72.1, --- N.m
Fuerza-12		Entidades: 1 Cargas de puntos Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 88.5 N Momentos: ---, 72.1, --- N.m

Información de malla

Tipo de malla	Malla de viga
---------------	---------------

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	364
Número total de elementos	354
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	USER



Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.590027	362.8	0	362.801

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	14.2429	-0.0225035	14.8607	20.584

Resultados del estudio

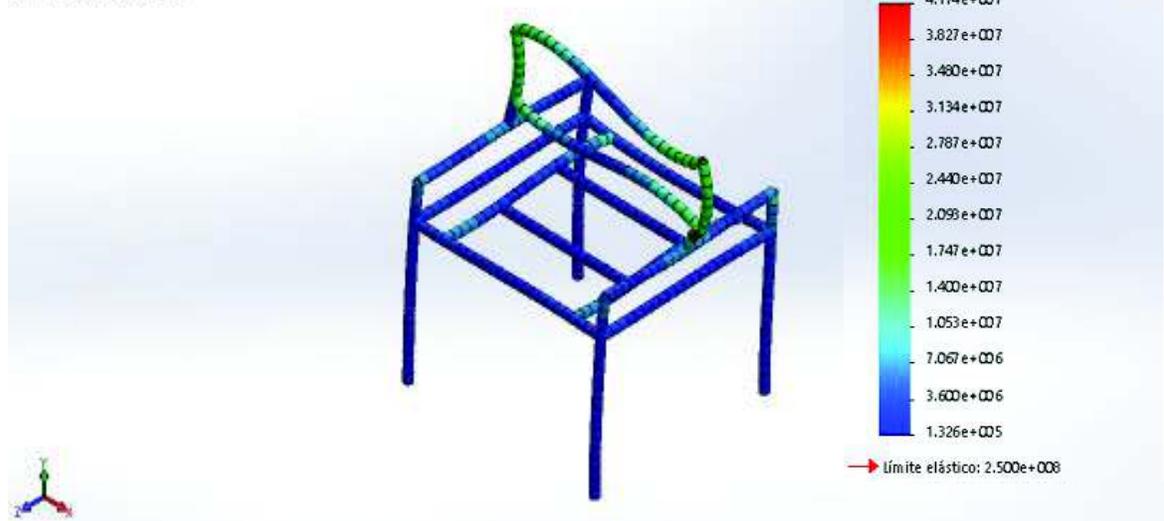
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	TXY:Tensión cortante en dir. Y en plano YZ	132584 N/m ² Elemento: 208	4.17368e+007 N/m ² Elemento: 59

Nombre del modelo: Simu

Nombre de estudio: Análisis estático 1: Predeterminado-1

Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior: Tensiones1

Escala de deformación: 640,236



Simu-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1

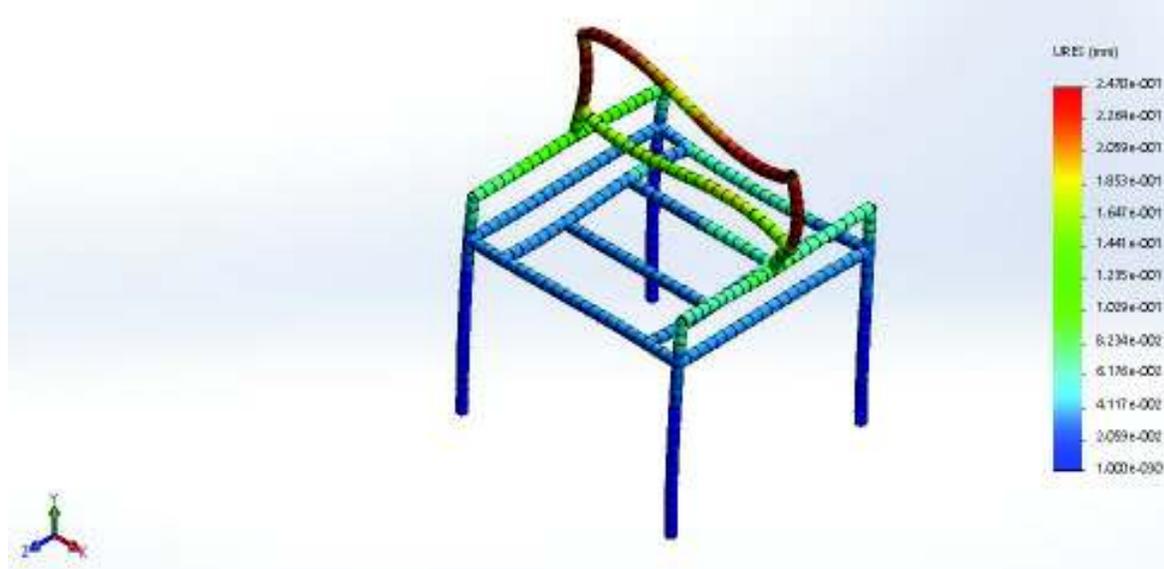
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0 mm Nodo: 135	0.247026 mm Nodo: 64

Nombre del modelo: Simu

Nombre de estudio: Análisis estático 1: Predeterminado-1

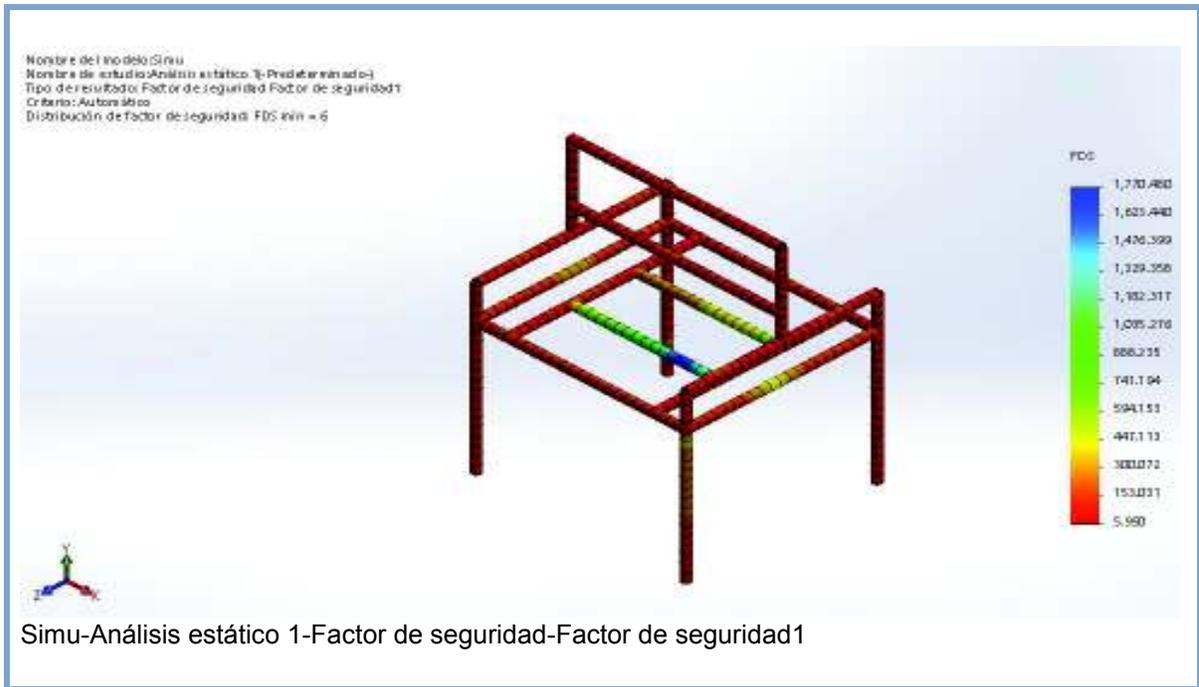
Tipo de resultado: Desplazamiento estático: Desplazamientos1

Escala de deformación: 640,236



Simu-Análisis estático 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	5.98992 Nodo: 57	1770.48 Nodo: 209

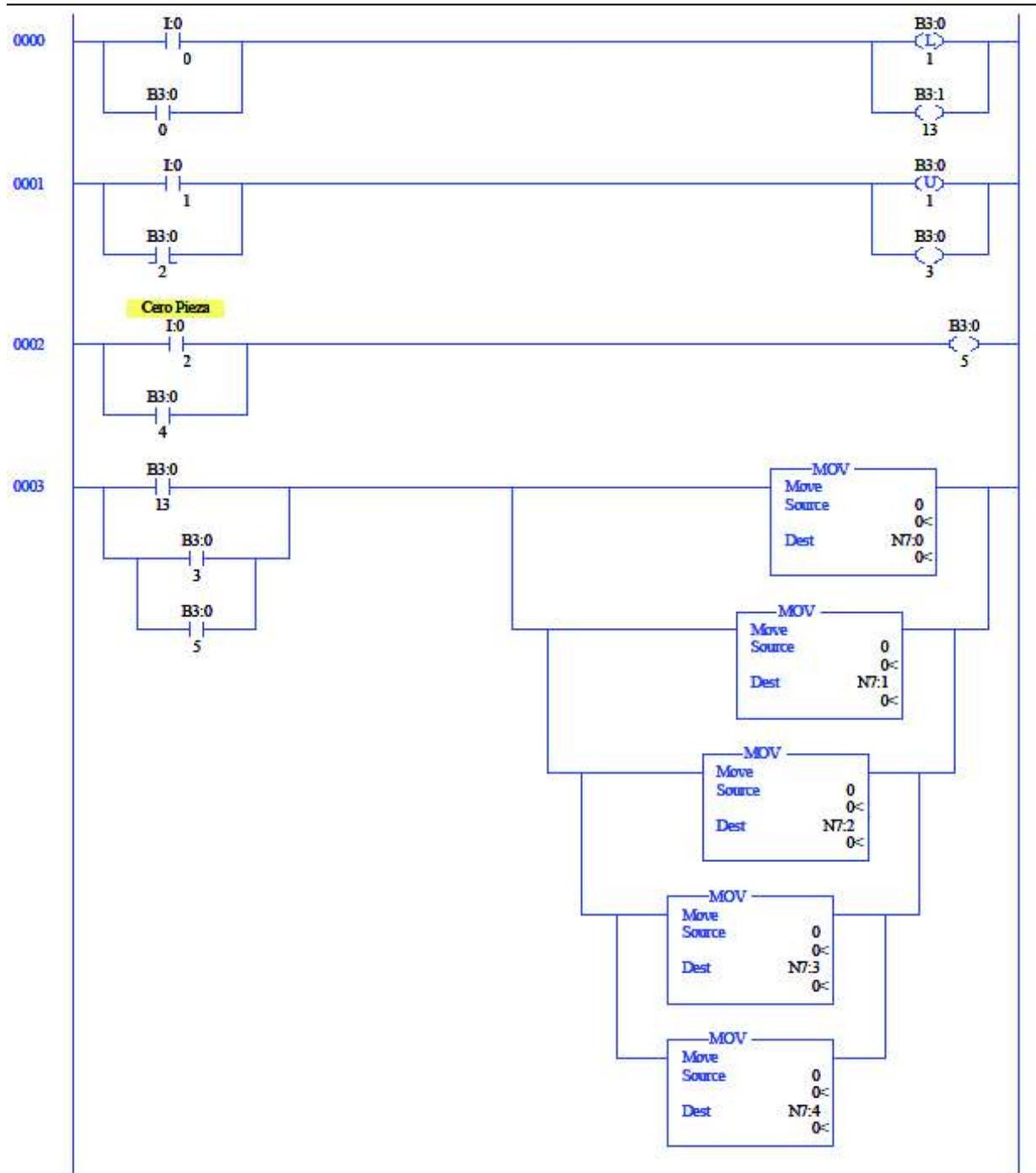


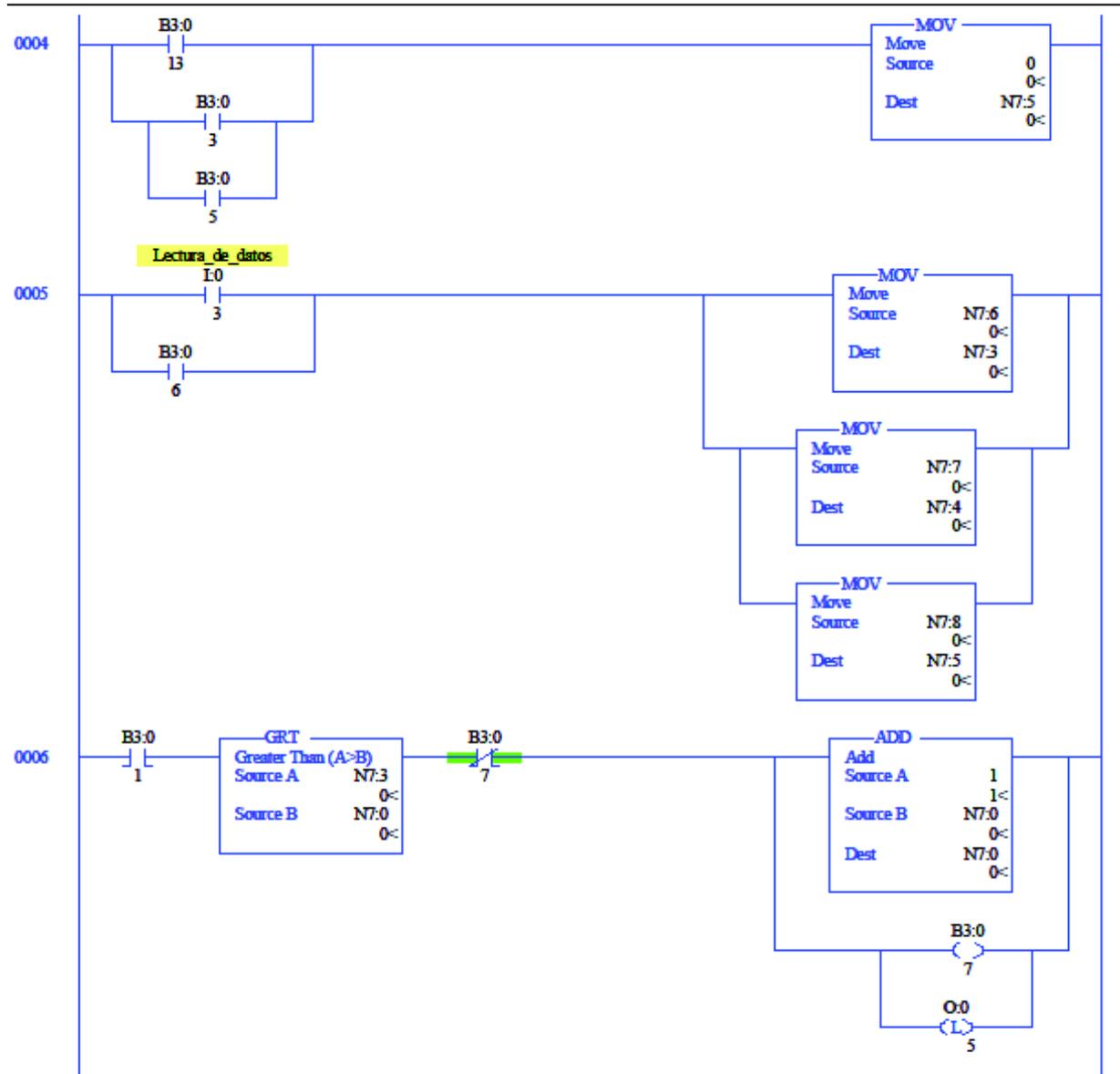
(Fuente: Propia)

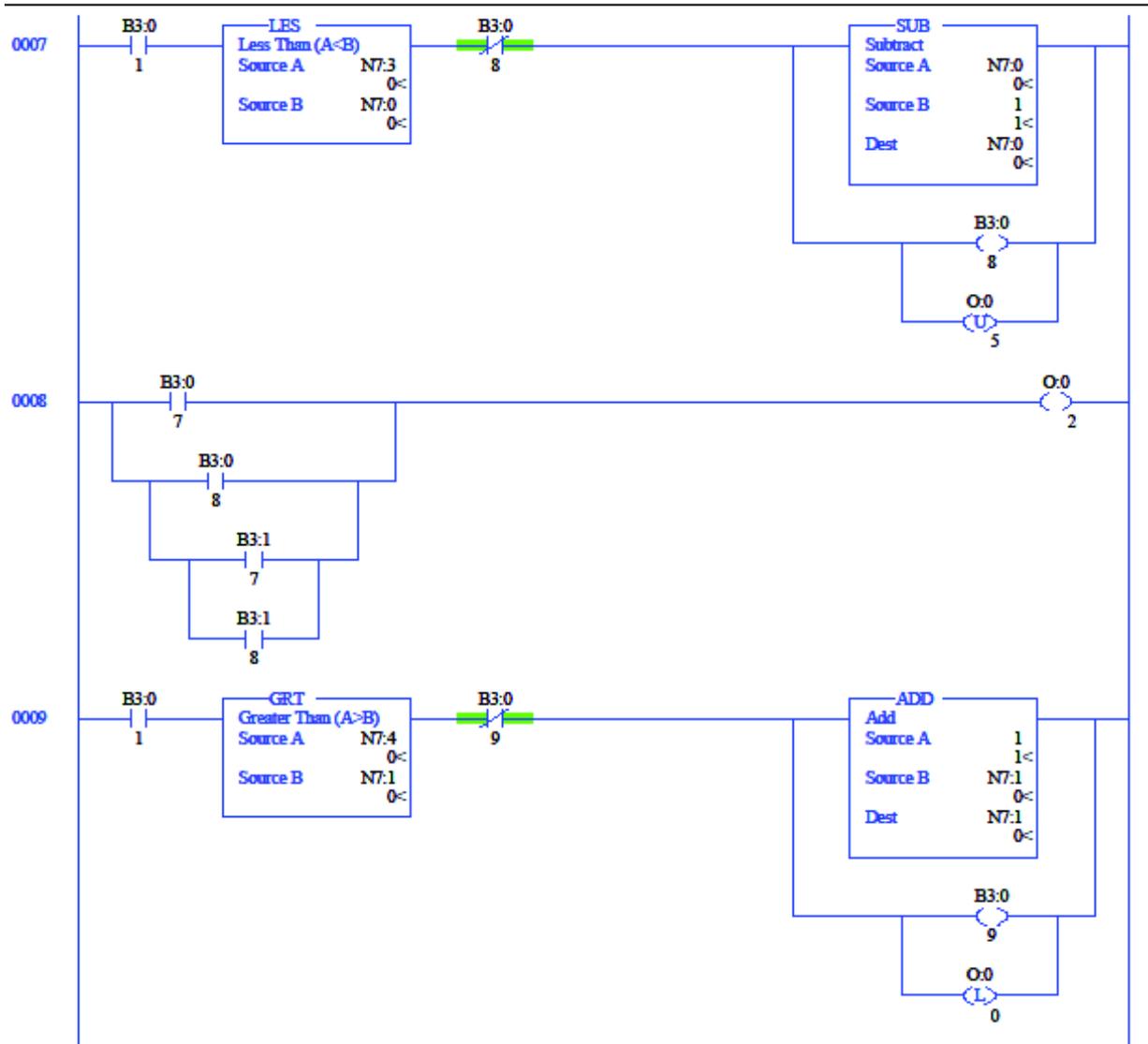
ANEXO XVI. Programa realizado en PLC MicroLogix 1100 de Allen-Bradley

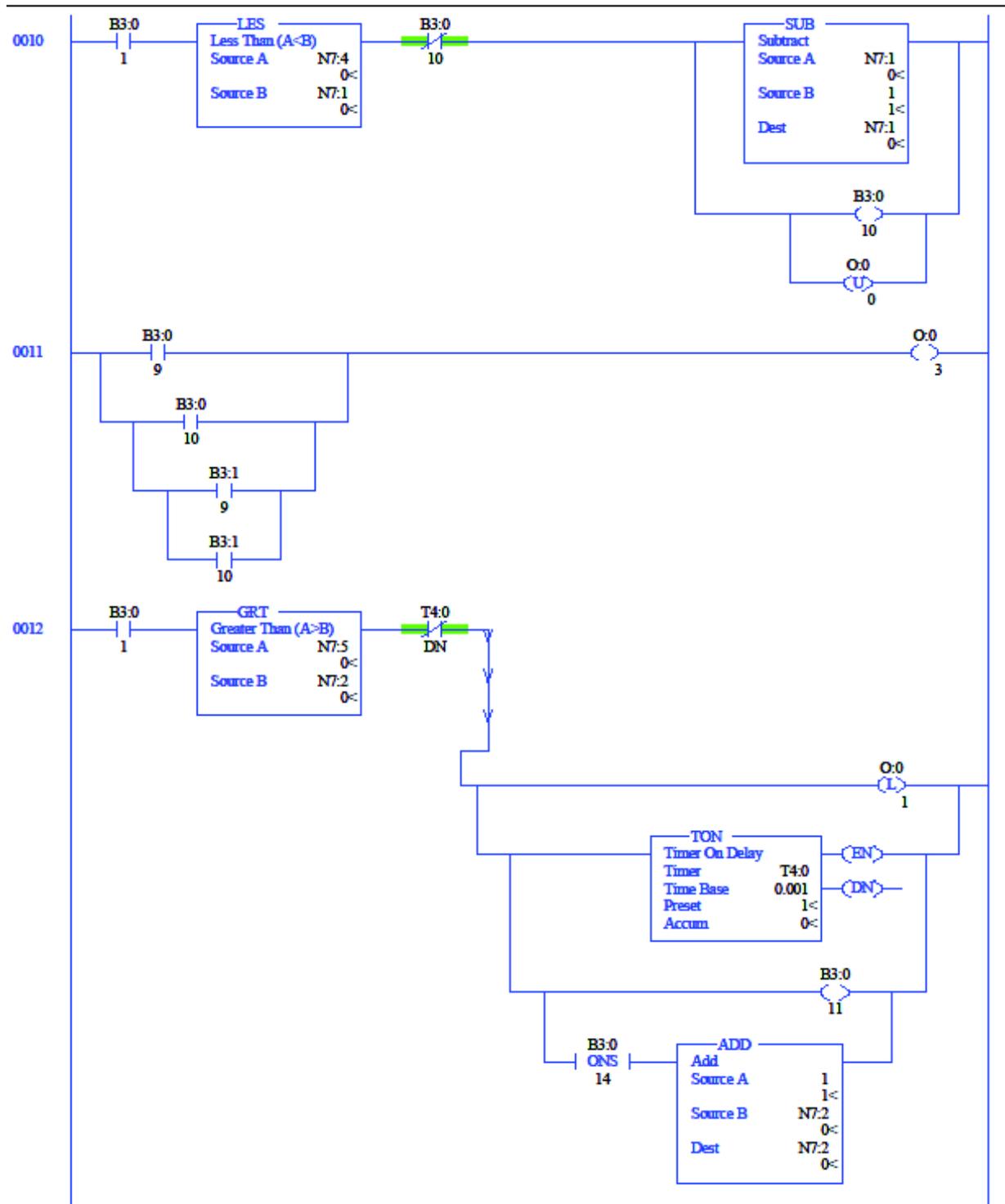
FINAL

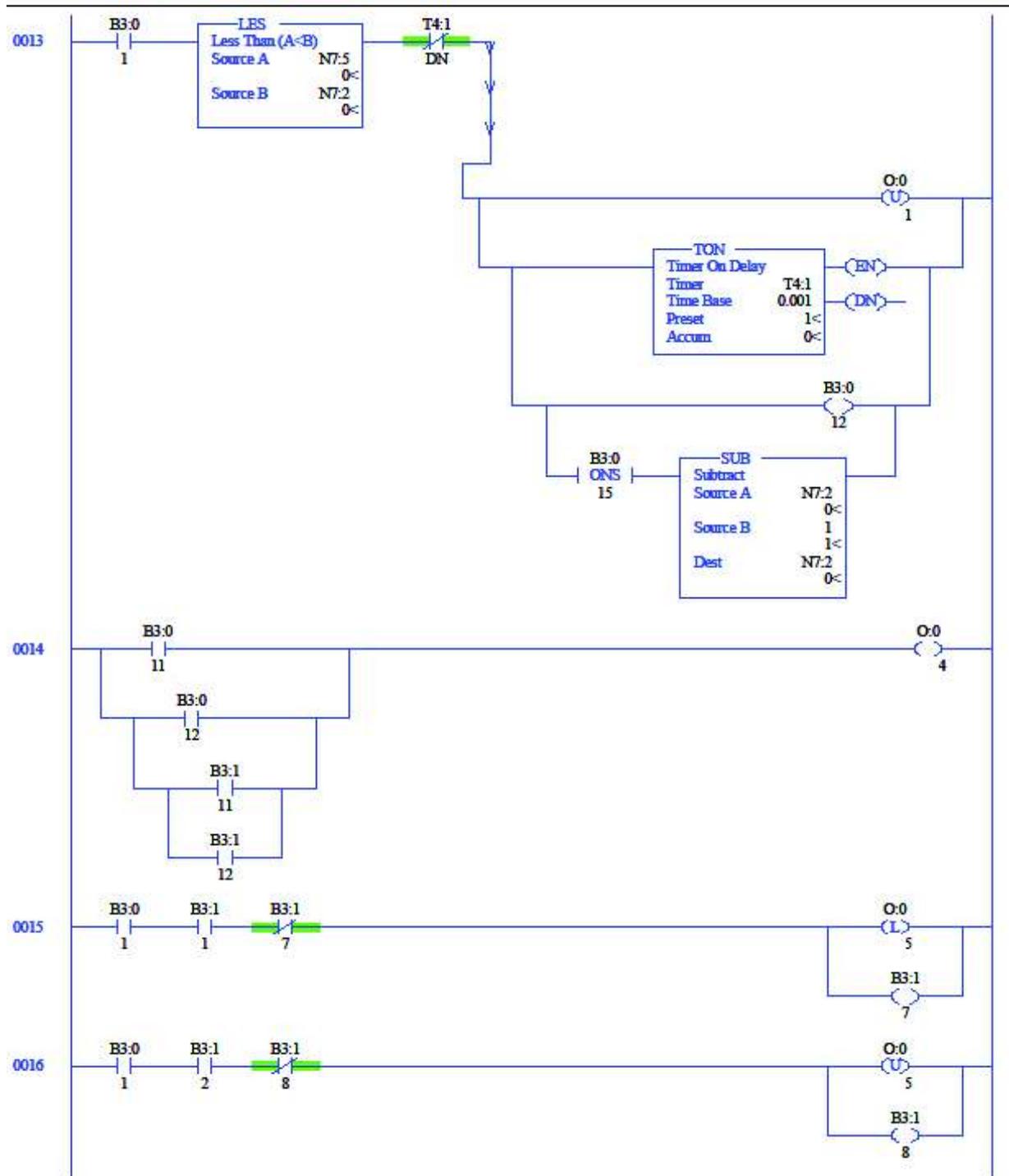
LAD 2 - --- Total Rungs in File - 22

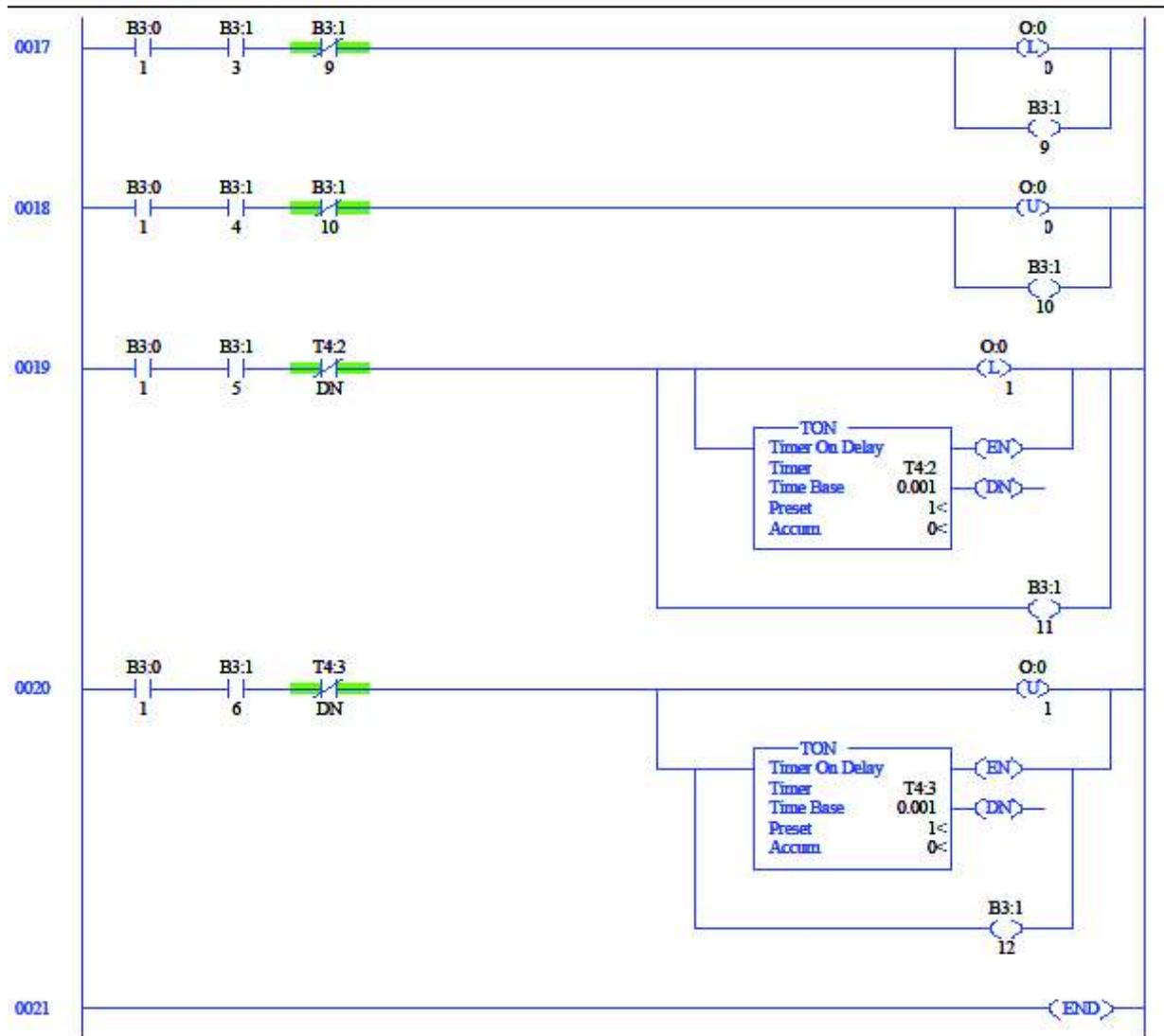












ANEXO XVII. Planos de conjunto y taller.