

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA CORTE DE PLANCHAS CON
PLASMA OPERADO POR COMPUTADOR”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN DISEÑO,
PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

FRANCISCO AGUSTÍN PEÑA JORDÁN
pfrancisco82@hotmail.com

ÁNGEL GABRIEL ZÚNIGA MORALES
angelo_1425@yahoo.es

DIRECTOR: VÍCTOR HUGO GUERRERO, PH.D.
victor.guerrero@epn.edu.ec

QUITO, SEPTIEMBRE DE 2015

DECLARACIÓN

Nosotros, Francisco Agustín Peña Jordán y Ángel Gabriel Zúñiga Morales, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Francisco Agustín Peña Jordán

Ángel Gabriel Zúñiga Morales

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Francisco Agustín Peña Jordán y Ángel Gabriel Zúñiga bajo mi supervisión.

Víctor H. Guerrero, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

A Dios por siempre estar a nuestro lado y habernos permitido llegar hasta este punto y darnos salud para cumplir con nuestros objetivos, a su infinita bondad y amor.

A nuestras familias por habernos educado y apoyado incondicionalmente, porque admiramos su fortaleza y perseverancia para darnos ejemplo de entrega y motivación durante toda nuestra vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar un trabajo arduo y lleno de dificultades durante la realización de este proyecto, queremos agradecer:

A la Escuela Politécnica Nacional

A nuestro director Dr. Víctor Guerrero, gracias a su esfuerzo y dedicación con sus conocimientos, experiencia y motivación ha podido guiarnos y ser un aporte para terminar nuestro tema de tesis así como desarrollarnos personalmente en la investigación.

Francisco Agustín Peña Jordán

Ángel Gabriel Zúñiga Morales

RESUMEN

El uso de antorchas de plasma representa una alternativa muy versátil para el corte de metales porque facilitan el procesamiento de piezas de distintas dimensiones y espesores, tales piezas tienen que ser de materiales conductores eléctricos, puesto que el material a ser cortado es parte del circuito de activación del plasma. El presente trabajo trata acerca del diseñar y construir un equipo para corte de planchas con plasma operado por computador. La selección de partes que conforman la máquina, se analiza por el método de la matriz de decisión ponderada; los criterios considerados básicamente son factores: económicos, mantenimiento, ruido, eficiencia mecánica, entre otros. Los sistemas que componen la mesa de corte son: sistema de transmisión de movimiento en los tres ejes, sistema de guiado, sistema de accionamiento y control, sistema de sustentación o soporte; los actuadores para la transmisión en los ejes son motores de paso híbridos. Los análisis de cargas y esfuerzos de las partes mecánicas, se realizan por medio del software SolidWorks 2013, mismo que utiliza el método de elementos finitos; mientras que para el análisis de la estructura se usa el software SAP2000. El control del equipo y a su vez la interfaz con el usuario es por medio del software MACH3, mismo que interpreta los códigos de control numérico. La capacidad de corte de la mesa construida es de 2440 mm de largo, 1220 mm con espesores de 4 a 35 mm; los rangos de velocidad son de 8 a 130 mm/s, para diámetros y muescas mayores a 60 mm y 5 mm, respectivamente. Los aspectos importantes a considerarse como mejora en un futuro son la adaptación de un control para la regulación automática de la altura de la antorcha de plasma; la adaptación de un cuarto eje para el movimiento angular de la antorcha, mismo que sirve para la realización de biseles; también la adaptación de cadenas de arrastre de cables o más conocidos como orugas.

PRESENTACIÓN

El avance de la tecnología ha llevado a que se desarrollen máquinas sofisticadas de corte de láminas de acero y otros materiales, cuyos acabados y tiempos de corte presentan una alta calidad. Estas alternativas de producción, representa costos de adquisición relativamente altos. En nuestro país una inversión de este tipo no podría justificar su compra, dependiendo el grado de producción a destinar.

En el mercado existen varias marcas de equipos que efectúan el corte mediante plasma; su variada forma y características técnicas, hace que el costo también sea diferente. Las características técnicas van desde su funcionalidad en dimensiones de corte hasta la aplicación de más de tres ejes para el corte con biselado y de varias antorchas al mismo tiempo. El crecimiento de área de construcción de edificaciones, ha hecho que empresas de dedicadas a fabricación de componentes estructurales, optimicen sus procesos, mediante la utilización mesas de corte automáticas que ayuden a incrementar la producción. Las partes a obtenerse con este proceso de corte automático y dependiendo de la precisión de los movimientos, son accesorios de cerrajería en chapa fina, corte de planchas de acero de grandes dimensiones para la industria naval, corte y perforado de perfiles y planchas de acero para puentes y edificios, corte de aceros especiales para su posterior maquinado para ser usados en matrices y herramientas. Por otra parte también son usadas en laboratorios donde el corte de materiales para pruebas y prototipos es indispensable para la investigación e innovación tecnológica. Trabajos similares se han realizado en otras universidades, tal es el caso de la Escuela Politécnica del Ejercito: “Diseño e implementación de un prototipo de torno fresador de control numérico computarizado para el laboratorio CNC de la ESPE extensión Latacunga”, Diseño y construcción de un pantógrafo mediante control numérico computarizado-CNC utilizando grabado por vibración y fresado; Universidad Politécnica Salesiana: “Diseño y construcción de un taladro XYZ, controlado por microcontrolador con interfaz gráfica mediante Labview para la fabricación de circuitos impresos”; Universidad San Francisco de Quito: “Diseño, construcción, programación de software y protocolo de transferencia de datos de una mesa de corte CNC por plasma a ser usada en el corte de planchas de acero inoxidable”.

El Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, ha identificado la necesidad de contar con un equipo de corte automático de planchas. Por esta razón es necesario satisfacer la siguiente necesidad: diseñar un equipo de corte automatizado mediante plasma, capaz de trabajar con láminas de 2440 mm de largo, 1220 mm de ancho y 35 mm de espesor. Los cortes a realizarse con este equipo serán rectos y curvos, definidos mediante líneas rectas, arcos de circunferencia y curvas en general. El manuscrito preparado en base al trabajo realizado en el proyecto de construcción de una mesa de corte por plasma está distribuido de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describe los sistemas de corte, se analiza el sistema de corte mediante plasma, las características del borde cortado según la norma. Se describe los elementos del control de sistemas automáticos de corte, mediante el uso de sistemas CAD-CAM, y por último se detalla los objetivos y alcances de este proyecto.

En el capítulo 2 se revisa la estructura funcional de la máquina, se utiliza el método de la matriz de decisión ponderada para seleccionar las mejores alternativas, para cada uno de las piezas mecánicas, motores y de control. Además se exponen las alternativas de diseño, que podrían adaptarse a satisfacer la necesidad del corte de planchas.

En el capítulo 3 se dimensionan los elementos que conforman los mecanismos de la mesa y se seleccionan los actuadores. El diseño de partes mecánicas se lo realiza por medio de elementos finitos, mientras que para la estructura de la mesa se lo analiza por medio de elementos estructurales con matrices de rigidez.

En el capítulo 4 se selecciona los elementos de control del sistema de corte, se realiza el diagrama de conexiones del sistema de control, se presentan las configuraciones de pines en el puerto paralelo para la comunicación entre el computador y el sistema de control, también se calcula los parámetros para la interpretación de señales entre el programa de control en el computador y el sistema de control.

En el capítulo 5 se detalla construcción y preparación de las partes que conforman la mesa de corte, calibración de los tres ejes de movimiento y prueba inicial sin equipo de corte. Además se detallan las pruebas de funcionamiento del

equipo, realizando el corte automático, con el objetivo de verificar su capacidad de corte en cuanto a su movilidad.

En el capítulo 6, se habla acerca de los costos, de elementos mecánicos, estructurales, de control, mano de obra, transporte e ingeniería utilizada. Aquí se puede identificar los gastos adicionales que se utilizan para generar un prototipo para la fabricación de esta máquina.

En el capítulo 7, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el proyecto de titulación. En este capítulo se destacan las principales conclusiones obtenidas a lo largo de la ejecución del proyecto, así como también las recomendaciones. La importancia de este capítulo, radica en que se presenta la experiencia adquirida, por lo tanto se recomienda al lector revisar con detenimiento este capítulo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	CAPÍTULO 1	1
1.1.	Sistemas de corte automatizado.....	1
1.2.	Automatización de sistemas de corte.....	3
1.3.	Sistemas de corte con plasma	11
1.4.	Sistema mecánico para soporte y avance de la antorcha de plasma.....	26
1.5.	Sistemas de control.....	27
1.5.1.	Lazos de control del sistema CNC	27
1.5.2.	Componentes del sistema de mando.....	29
1.5.3.	Componentes del sistema CNC	42
1.5.4.	Funciones MMI	43
1.5.5.	Funciones NCK	44
1.5.6.	Funciones PLC	45
1.5.7.	Sistema de control de tiempo real	47
1.6.	Sistemas cad-cam	48
1.6.1.	Tareas fuera de línea: CAD, CAPP, CAM.....	49
1.6.2.	Tareas en línea: Mecanizado NC, monitoreo y medición en la máquina.....	50
1.7.	Identificación de necesidades	51
1.8.	Objetivos y alcance.....	51
2.	CAPÍTULO 2	53
2.1.	Estructura funcional.....	53
2.2.	Especificaciones de diseño	55
2.2.1.	Identificación de mercado	55
2.2.2.	Identificación del producto.....	56
2.2.3.	Descripción física	59
2.3.	Alternativas de diseño	59
2.4.	Criterios para la evaluación de alternativas.....	60
2.5.	Selección de alternativas	61
2.5.1.	Transmisión de movimiento	61
2.5.2.	Sistema de guiado.....	63
2.5.3.	Soporte de antorcha	64
2.5.4.	Actuadores.....	65
2.5.5.	Resumen de selección de alternativas	66
2.6.	Diseño preliminar	68
3.	CAPÍTULO 3	70
3.1.	Sistemas de transmisión de movimiento y guías	70
3.2.	Diseño de elementos mecánicos.....	70
3.2.1.	Diseño de elementos de movimiento en el eje z.....	72

3.2.2.	Diseño de elementos de movimiento en el eje y	76
3.2.3.	Diseño de elementos de movimiento en el eje x	87
3.2.4.	Análisis de esfuerzos en las ruedas de guías	101
3.2.5.	Análisis de fatiga	102
3.2.6.	Pernos para sujetar elementos mecánicos.....	111
3.2.7.	Viga soporte de mecanismos y - z	115
3.3.	Diseño de estructura de mesa	116
3.3.1.	Análisis de fuerzas aplicadas.....	116
3.3.2.	Método de diseño y combinaciones de carga	117
3.3.3.	Pernos para la estructura.....	120
4.	CAPÍTULO 4.....	125
4.1.	Sistema de control	125
4.2.	Sensores y actuadores.....	125
4.2.1.	Tipos de sensores para fines de carrera	126
4.2.2.	Selección de sensores para fines de carrera.....	127
4.2.3.	Actuadores	128
4.3.	Sistema de control automático.....	130
4.3.1.	Tarjeta de interfaz de control.....	130
4.3.2.	Control de altura de la antorcha.....	133
4.4.	Diseño del sistema de control.....	135
4.5.	Configuración en el programa de control.....	135
4.6.	Afinación de motores.....	139
5.	CAPÍTULO 5.....	144
5.1.	Construcción del sistema mecánico y montaje del sistema electrónico	144
5.2.	Construcción de la estructura soporte.....	145
5.3.	Construcción del sistema de transmisión y control de avance de la antorcha.	149
5.4.	Limpieza y pintura de estructura de soporte.....	151
5.5.	Ensamble final de partes mecánicas y motores	153
5.5.1.	Montaje de parte mecánicas	153
5.5.2.	Montaje de motores	154
5.6.	Sistema electrónico.....	155
5.7.	Pruebas de funcionamiento.....	157
6.	CAPÍTULO 6.....	162
6.1.	Análisis económico	162
6.2.	Costo de partes mecánicas.....	162
6.3.	Costos partes eléctricas, electrónicas y de control	164
6.4.	Costo por transporte y mano de obra.....	165
6.5.	Costo por ingeniería y planificación.....	166

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
7.1.	Conclusiones.....	168
7.2.	Recomendaciones	169
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172
Anexo 1	.....	175
Anexo 2	.....	178
Anexo 3	.....	180
Anexo 4	.....	182
Anexo 5	.....	184
Anexo 6	.....	187
Anexo 7	.....	190
Anexo 8	.....	191
Anexo 9	.....	195
Anexo 10	.....	202
Anexo 11	.....	207

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Corte automático de perfiles mediante plasma (7).....	6
Figura 1.2. Equipo de generación de arco de plasma (8).	7
Figura 1.3. Sistema semiautomático de corte con plasma (9).	8
Figura 1.4. Esquema de la configuración del sistema de corte de tubos (10).	8
Figura 1.5. Juntas típicas en tubería y formas de corte (10).....	9
Figura 1.6. Sistema automático de corte de planchas mediante plasma (11).	9
Figura 1.7. Esquema del proceso de evaporación del material cortado, incluyendo la generación de gotas de metal fundido debido a sobrecalentamiento incontrolado de la superficie (12 pág. 46).....	12
Figura 1.8. Esquema de sistema de corte mediante plasma (15).	15
Figura 1.9. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma convencional o corte mediante plasma seco (14 pág. 12).	17
Figura 1.10. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con medio secundario de agua (14 pág. 12).	18
Figura 1.11. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con medio secundario de gas (14 pág. 12).	19
Figura 1.12. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con inyección de agua (14 pág. 13).	20
Figura 1.13. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma: (a) con incremento de la constricción, (b) con incremento de constricción ajustable (14 pág. 13).....	21
Figura 1.14. Parámetros de calidad del corte mediante plasma.	22
Figura 1.15. Tolerancia perpendicular y angular (5 pág. 5).	22
Figura 1.16. Promedio de piso de altura al valle: $Zt1$ a $Zt5$, representa la altura del pico al valle de un grupo perfiles; l_n , representa la longitud de evaluación; l_r , representa la longitud de muestreo para cinco grupos o $l_n/5$ (5 pág. 6).....	23
Figura 1.17. Líneas de arrastre formadas durante el corte: a, línea de referencia; b, línea de arrastre; c, dirección de avance de corte (5 pág. 4).....	23
Figura 1.18. Fusión de borde superior: (a) borde agudo; (b) borde fundido; (c) corte con borde saliente (5 pág. 6).	23
Figura 1.19. Tolerancia perpendicular o angular para espesores de hasta 150 mm (5 pág. 22).	24
Figura 1.20. Tolerancia de rugosidad para espesores de hasta 150 mm (5 pág. 23).	24
Figura 1.21. Tres tipos de lazos de control en un eje de movimiento del sistema CNC (18 pág. 17):	27
Figura 1.22. Clasificación de lazos de control en el sistema CNC (18 pág. 20).	29
Figura 1.23. Tipos de servo motor (18 pág. 10).....	31
Figura 1.24. Codificador óptico incremental (19 pág. 168).	33
Figura 1.25. Codificador absoluto, esquema de un rotor simplificado de 4 sectores (16 posiciones) (20 pág. 123).....	33
Figura 1.26. Ciclo de funcionamiento o trabajo para un motor en sistema de pasos o servo motor.....	35
Figura 1.27. Mecanismo tornillo de bolas/ tuerca (21 pág. 4/28).	36
Figura 1.28. Mecanismo cremallera-rueda (22).	36
Figura 1.29. Guías tipo M para movimiento lineal (23).	38
Figura 1.30. Guías redondas para movimiento lineal (24).	38

Figura 1.31. Estructura del sistema de levitación magnética (26).....	40
Figura 1.32. Acoples y transmisores de potencia (a) acople para ejes, (b) acople elástico, (c) transmisión de potencia con bandas, (d) transmisión de potencia con rueda dentada.....	41
Figura 1.33. Detalle general de componentes del sistema CNC (18 pág. 20).	42
Figura 1.34. Componentes de un sistema CNC (18 pág. 21).	42
Figura 1.35. Configuración y funciones del sistema PLC (18 pág. 27).....	46
Figura 1.36. Programación de tareas en un sistema NC (18 pág. 28).	47
Figura 1.37. Configuración de las máquinas herramientas NC y el flujo de operación de mecanizado (18 pág. 7).....	49
Figura 2.1. Flujo de procesos para el diseño de máquina herramienta (31).	54
Figura 2.2. Estructura funcional global de la máquina de corte mediante plasma.	54
Figura 2.3. Estructura funcional y detalle de actividades específicas de la máquina de corte.....	55
Figura 2.4. Árbol objetivo para la selección de mecanismos ejes X, Y y Z.	62
Figura 2.5. Árbol objetivo para la selección de guías.	63
Figura 2.6. Antorcha manual adaptada al sistema de corte automático (42)	64
Figura 2.7. Antorcha industrial adaptada al sistema de corte automático (43).....	64
Figura 2.8. Árbol objetivo para la selección de soporte de antorcha.	65
Figura 2.9. Árbol objetivo para la selección de motores.	66
Figura 2.10. Identificación de alternativas seleccionadas.....	69
Figura 3.1. Perfil de funcionamiento o de trabajo para los ejes Y y X en el corte mediante plasma.	71
Figura 3.2. Proceso de selección de motores y diseño de elementos mecánicos.	72
Figura 3.3. Elementos mecánicos para movimiento en el eje Y.	73
Figura 3.4. Datos de salida: tornillo y guías para el eje Z.	75
Figura 3.5. Datos de salida: tuerca y patines de guías para el eje Z.	76
Figura 3.6. Elementos mecánicos para movimiento en el eje Y.	77
Figura 3.7. Diámetro de paso rueda dentada eje Y.....	78
Figura 3.8. Datos mecanismos Z-Y.....	79
Figura 3.9. Mecanismos eje Y - Z.	81
Figura 3.10. Diagrama de cuerpo libre para los soportes de mecanismos Y- Z.....	82
Figura 3.11. Esfuerzo de Von Mises para las guías del eje Y.	84
Figura 3.12. Desplazamiento máximo para las guías del eje Y.....	84
Figura 3.13. Factor de seguridad mínimo para las guías del eje Y.....	85
Figura 3.14. Esfuerzo de Von Mises para las cremalleras del eje Y.....	85
Figura 3.15. Desplazamiento máximo para las cremalleras del eje Y.	86
Figura 3.16. Factor de seguridad mínimo para las cremalleras del eje Y.	86
Figura 3.17. Esfuerzo cortante máximo en la rueda dentada del eje Y.	86
Figura 3.18. Desplazamiento máximo en la rueda dentada del eje Y.....	87
Figura 3.19. Factor de seguridad mínimo en la rueda dentada del eje Y.....	87
Figura 3.20. Elementos mecánicos para movimiento en el eje X.	88
Figura 3.21. Diámetro de paso rueda dentada eje X.....	89
Figura 3.22. Datos de los mecanismos X-Y-Z, datos numéricos.	90
Figura 3.23. Datos de los mecanismos X-Y-Z, modelo tridimensional.....	90

Figura 3.24. Mecanismos ejes X-Y-Z.	94
Figura 3.25. Diagrama de cuerpo libre para los soportes de mecanismos X - Y - Z.	95
Figura 3.26. Esfuerzo de Von Mises en las guías del eje X.....	97
Figura 3.27. Desplazamiento máximo en las guías del eje X.	97
Figura 3.28. Factor de seguridad mínimo en las guías del eje X.	97
Figura 3.29. Esfuerzo de Von Mises en las cremalleras del eje X.	98
Figura 3.30. Desplazamiento máximo en las guías del eje X.	99
Figura 3.31. Factor de seguridad mínimo en las guías del eje X.	99
Figura 3.32. Esfuerzo cortante máximo en la rueda dentada del eje X.	100
Figura 3.33. Desplazamiento máximo en la rueda dentada del eje X.....	100
Figura 3.34. Factor de seguridad mínimo en la rueda dentada del eje X.....	101
Figura 3.35. Esfuerzo de Von Mises en las ruedas de guías.....	101
Figura 3.36. Desplazamiento máximo en las ruedas de guías.	101
Figura 3.37. Factor de seguridad en las ruedas de guías.	102
Figura 3.38. Parámetros que intervienen en la junta con pernos Allen.....	114
Figura 3.39. Esfuerzo de Von Mises en la viga eje Y.	115
Figura 3.40. Desplazamiento máximo en la viga eje Y.....	115
Figura 3.41. Factor de seguridad mínimo en la viga eje Y.	116
Figura 3.42. Vista general de la estructura de mesa de corte mediante plasma.....	117
Figura 3.43. Materiales asignados a la estructura de la mesa de corte.....	118
Figura 3.44. Vista tridimensional estructura para la mesa de corte.	118
Figura 3.45. Asignación de cargas producidas por el movimiento de los mecanismos [N].	119
Figura 3.46. Asignación de peso de guías y soportes de plancha [N/m].	119
Figura 3.47. Asignación de peso de plancha, contenedor y agua [N/m].	119
Figura 3.48. Relación de esfuerzos en la estructura.	120
Figura 3.49. Parámetros que intervienen en la junta con pernos hexagonales.....	121
Figura 4.1. Sensor de proximidad inductivo (55).	126
Figura 4.2. Sensor óptico (56).	126
Figura 4.3. Interruptor final de carrera (57).	127
Figura 4.4. Interruptor de paro de emergencia (58).	127
Figura 4.5. Árbol objetivo para la selección de sensor.	128
Figura 4.6. Actuadores o motores de paso a utilizarse.....	129
Figura 4.7. Lazos de control aplicado al sistema de control de movimiento para el corte automático de planchas mediante antorcha de plasma.....	130
Figura 4.8. Tarjeta de interfaz de control universal (CandCNC UBOB III) (59).	131
Figura 4.9. Tarjeta de interfaz de control (DB25-1205) (60).	132
Figura 4.10. Tarjeta de interfaz de control (DB25-1205), identificación de pines.	132
Figura 4.11. Control de altura de la antorcha de plasma trabajando (42).	133
Figura 4.12. Control de altura de la antorcha CandCNC DTHC IV (61).	134
Figura 4.13. Control de altura de la antorcha THC Compacto 150 (62).	134
Figura 4.14. Árbol objetivo para la selección del control de altura de la antorcha.	134
Figura 4.15. Asignación de puerto y velocidad de trabajo.	136
Figura 4.16. Asignación de señales de salida a los motores de paso.	136
Figura 4.17. Asignación de límites de carrera y retorno a las coordenadas de origen....	137
Figura 4.18. Asignación de paro de emergencia y controles de altura de la antorcha.	137

Figura 4.19. Asignación de pin para la habilitación de motores.....	138
Figura 4.20. Activación del control de altura de la antorcha.	139
Figura 4.21. Selección de unidades de trabajo.	139
Figura 4.22. Ingreso de datos para el movimiento del eje X. 1) Pasos/mm, 2) Velocidad máxima correspondiente a 130 mm/s, 3) Aceleración de movimiento calculado en el capítulo 3.....	140
Figura 4.23. Controladores de los motores de paso para los ejes X, Y y Z.	141
Figura 5.1. Proceso para la construcción de la estructura soporte.	145
Figura 5.2. Trazo para corte de elementos.	146
Figura 5.3. Maquinado de elementos, guías y placas mediante fresadora.	146
Figura 5.4. Placas perforadas mediante fresadora.....	147
Figura 5.5. Armado de bases de nivelación de mesa.....	147
Figura 5.6. Armado de columnas y bases de nivelación de mesa de corte.	148
Figura 5.7. Alineación y nivelación de estructura fija de la mesa de corte.....	149
Figura 5.8. Alineación de guías eje X-X.	149
Figura 5.9. Cremalleras maquinadas para los ejes X-X y para ejes Y-Y.	150
Figura 5.10. Montaje de estructura para los ejes Y - Y y Z - Z.	150
Figura 5.11. Mecanismo de elevación de antorcha, eje Z – Z.	151
Figura 5.12. Montaje de mecanismo soporte de eje Z – Z.	151
Figura 5.13. Limpieza de elementos mesa.....	152
Figura 5.14. Protección de material mediante pintura anticorrosiva.	152
Figura 5.15. Acabado final de estructura.....	152
Figura 5.16. Alineación de estructura fija después de pasar el proceso de limpieza y pintado. (a) Vista general, (b) Acercamiento a la base de anclaje.....	153
Figura 5.17. Armado de cremalleras en estructura fija de mesa.	154
Figura 5.18. Acoplamiento de motores en cremalleras de ejes.	154
Figura 5.19. Montaje de motor en el eje Z - Z.	155
Figura 5.20. Cama de platinas.	155
Figura 5.21. Sensor tipo palanca NC del eje Z – Z.....	156
Figura 5.22. Conexión de sistemas eléctricos.	157
Figura 5.23. Prueba con muescas de diferentes anchos.....	158
Figura 5.24. Prueba ejecutada en concordancia con la figura 5.25. Las muescas de 2 y 3 mm, no se realiza de manera satisfactoria de 5 a 130 mm/s.....	158
Figura 5.25. Circulo de diámetro 50 mm trazado a distintas velocidades.	159
Figura 5.26. Circulo de diámetro 60 mm trazado a velocidades entre 8 y 130 mm/s.....	159
Figura 5.27. Dimensiones para la figura combinada.	159
Figura 5.28. Trazo realizado con la máquina de corte para la figura 5.27.	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Aplicaciones, ventajas y desventajas de procesos de corte.	2
Tabla 1.2. Clasificación de perfiles metálicos según su forma.	6
Tabla 1.3. Comparación de métodos de corte.....	10
Tabla 1.4. Datos característicos de las piezas consumibles utilizados con quemadores de plasma (14 pág. 9).	13
Tabla 1.5. Principales propiedades de gases de corte (14 pág. 16).	14
Tabla 1.6. Recomendaciones de mezcla de gas y su impacto en la calidad del borde cortado (14 pág. 20).	16
Tabla 1.7. Valores mínimos de pureza de los gases de corte de plasma (14 pág. 21).	16
Tabla 1.8. Potenciales peligros del proceso de corte mediante el arco de plasma.(16)....	25
Tabla 1.9. Recomendaciones de grada de opacidad de filtros para la vista para varias corrientes de arco (16).	26
Tabla 1.10. Parámetros ecológicos del proceso de corte, aire como gas plasma (17).....	26
Tabla 1.11. Resumen de características de los tipos de servo motor (18 pág. 12).	32
Tabla 1.12. Características de los tipos de motores de paso.	34
Tabla 1.13. Principales características de mecanismos de transformación de movimiento giratorio a lineal.	37
Tabla 1.14. Ventajas y desventajas de guías cuadradas y redondas.	38
Tabla 1.15. Comparación de características entre patines deslizantes y rodantes (25). ...	39
Tabla 1.16. Códigos de direcciones para control numérico.....	48
Tabla 2.1. Comparación entre las máquinas de corte automático mediante plasma existentes en el mercado.	56
Tabla 2.2. Resumen de alternativas seleccionadas.	60
Tabla 2.3. Criterios a ser evaluados para diferentes partes de mesa de corte	61
Tabla 2.4. Matriz de decisión ponderada para la selección de mecanismo en los ejes X - Y.	62
Tabla 2.5. Matriz de decisión ponderada para la selección de mecanismo en el eje Z.....	63
Tabla 2.6. Matriz de decisión ponderada para la selección de guías.	64
Tabla 2.7. Matriz de decisión ponderada para la selección de soporte de antorcha.....	65
Tabla 2.8. Matriz de decisión ponderada para la selección de motores.	66
Tabla 2.9. Resumen de alternativas seleccionadas.	67
Tabla 2.10. Descripción de alternativas de diseño preliminar de la mesa de corte.....	68
Tabla 3.1. Dimensiones para el tornillo rosca cuadrada de diámetro $\frac{3}{4}$ ".	73
Tabla 3.2. Cálculo de parámetros para la selección de motor del eje Z.	74
Tabla 3.3. Cálculo de velocidades aceleraciones y tiempo para el eje Y.....	78
Tabla 3.4. Cálculo de torques y selección del motor del eje Y.	79
Tabla 3.5. Resultados de cálculo de fuerzas dinámicas.....	82
Tabla 3.6. Cálculo de reacciones del mecanismo de los ejes Y-Z.....	82
Tabla 3.7. Cálculo de velocidades, aceleraciones y tiempo.	89
Tabla 3.8. Cálculo de torques y selección del motor eje X.	91
Tabla 3.9. Resultados de cálculo de fuerzas dinámicas para el eje X.	94
Tabla 3.10. Cálculo de reacciones del mecanismo eje X.	95
Tabla 3.11. Factores de acabado superficial (51 pág. 318).....	102

Tabla 3.12. Análisis de fatiga para tornillo rosca cuadrada.	102
Tabla 3.13. Análisis de fatiga guías del eje Y.	103
Tabla 3.14. Análisis de fatiga guías del eje X.	104
Tabla 3.15. Análisis de fatiga cremallera eje Y.	105
Tabla 3.16. Análisis de fatiga cremallera eje X.	106
Tabla 3.17. Análisis de fatiga rueda dentada eje Y.	108
Tabla 3.18. Análisis de fatiga rueda dentada eje X.	109
Tabla 3.19. Análisis de fatiga rueda guías.	110
Tabla 3.20. Resumen de resultados de diseño de elementos mecánicos.	111
Tabla 3.21. Reacciones en los elementos sujetos con pernos Allen.	111
Tabla 3.22. Análisis de junta entre soporte y guías del eje Y.	111
Tabla 3.23. Resumen de selección de pernos en juntas de elementos mecánicos.	114
Tabla 3.24. Desplazamiento en las vigas longitudinales (HEB140).	120
Tabla 3.25. Desplazamiento en las vigas soporte de planchas (IPE120).	120
Tabla 3.26. Reacciones en los elementos sujetos con pernos cabeza hexagonal.	121
Tabla 3.27. Análisis de junta entre columnas y vigas transversales.	121
Tabla 3.28. Resumen de selección de pernos en juntas de estructura soporte.	123
Tabla 4.1. Matriz ponderada para la selección de sensor.	128
Tabla 4.2. Datos técnicos de actuadores o motores de paso.	129
Tabla 4.3. Matriz ponderada para la selección del control de altura de la antorcha.	135
Tabla 4.4. Cálculo de parámetros para configuración en el programa MACH3.	140
Tabla 4.5. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM542A, correspondiente al eje Z.	141
Tabla 4.6. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM542A, correspondiente al eje Z.	141
Tabla 4.7. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM860A, correspondiente al eje Y.	142
Tabla 4.8. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM860A, correspondiente al eje Y.	142
Tabla 4.9. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM2722A, correspondiente al eje X.	142
Tabla 4.10. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM2722A, correspondiente al eje X.	143
Tabla 5.1. Operaciones de fabricación de elementos de la estructura.	145
Tabla 5.2. Comparación de características entre el proyecto de tesis y el equipo de ELIMED.	161
Tabla 6.1. Elementos mecánicos prefabricados.	163
Tabla 6.2. Costos de elementos estructurales.	163
Tabla 6.3. Costos de elementos mecánicos.	163
Tabla 6.4. Costos de elementos de ajuste.	164
Tabla 6.5. Costo de partes eléctricas, electrónicas y de control.	165
Tabla 6.6. Costo por transporte.	165
Tabla 6.7. Costo por mano de obra.	166
Tabla 6.8. Resumen de costos.	167

CAPÍTULO 1

En este capítulo se describe los sistemas de corte, la clasificación, comparación de sistemas similares, se presenta la descripción del sistema de corte mediante plasma, las características del borde cortado según la norma AWS C4.6M:2006. También se describen los diferentes elementos de control para procesos automáticos de corte, mediante el uso de sistemas CAD-CAM. Adicionalmente, se proponen los objetivos y alcance del presente proyecto.

1.1. SISTEMAS DE CORTE AUTOMATIZADO

La construcción ha crecido notablemente en nuestro país, debido a la necesidad de infraestructura para las diversas industrias, como son: petrolera, telecomunicación, vial, vivienda, entre otras. Las empresas metalúrgicas, empresas de estructuras metálicas, inclusive las metalmecánicas dedicadas a implementos de hogar, realizan procesos de corte mecánico y térmico.

Por medio de la investigación se ha logrado controlar procesos automáticamente, integrando varios conocimientos para lograr sistemas multidisciplinarios que controlen variables de procesos determinados. Muchos de los procesos de fabricación consisten en remover material para conformar partes con dimensiones requeridas a partir de la materia prima, que por lo general se la consiguen con dimensiones estandarizadas.

Como se puede observar en la tabla 1.1, existen métodos similares al corte con plasma como son: el oxicorte, el láser, el haz de electrones, chorro de agua y la electroerosión; que básicamente están destinados al corte de elementos tipo placa. Estos métodos presentan ventajas y desventajas, diferentes rugosidades y tolerancias, capacidad de corte.

Tabla 1.1. Aplicaciones, ventajas y desventajas de procesos de corte.

Proceso de corte	Electroerosión	Chorro de agua	Haz de electrones	Rayo láser	Arco de plasma	Oxicorte
Afectación térmica	Muy baja	No	Muy baja	Bajo	Alto	Alto
Endurecimiento de borde cortado	Mínimo	No	Mínima	Mínima	Alto	Alto
Esfuerzos residuales	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Alto	Alto
Clasificación	Eléctrico	Mecánico	Térmico	Térmico	Térmico	Térmico
Tipo de material a cortar	Metálicos	Metal, no metal, polímeros, hule, madera, papel, compuestos	Metálicos, no metálicos, polímeros, cerámicos y compuestos	Metálicos no metálicos, cerámicos y compuestos	Metálicos	Metálicos
Espesor máximo de corte [mm]	200 (1 pág. 768)	200 (1 pág. 768)	6.3 (2)	12 acero, 4 aluminio (1 pág. 768)	200 (1 pág. 768)	600 (3 pág. 959)
Tolerancias [mm]	0.01-0.03 (1 pág. 768)	0.2 a 0.4 ⁽¹⁾ (pág. 768)	± 0.012 a ± 0.05 (4 pág. 6/7)	± 0.25 (5 pág. 22)	± 1.2 a ± 2* (5 pág. 22)	± 0.4 a ± 0.8* (5 pág. 22)
Rugosidad [um]	0.2 a 1 (1 pág. 768)	1 a 2 (1 pág. 768)	0.8 a 6.3 (3 pág. 839)	60 (5 pág. 23)	80 a 125 * (5 pág. 23)	70 a 120 ** (5 pág. 23)
Ventajas	Se procesa materiales como: carburos de tungsteno, cerámicas y otros materiales duros -Se pueden maquinar secciones delgadas y complicados	Corta cualquier material - se pueden cortar materiales delgados - La superficie de trabajo no se deforma ni se quema -la pérdida de material es mínima, proceso ambientalmente seguro	Micro mecanizado de agujeros de hasta 0.05 mm de diámetro	Cortes de pequeña escala, perforación de agujeros de 0.005 mm de diámetro con relaciones profundidad/diámetro 50:1	Alta velocidad de corte, costo de equipos relativamente bajos, en comparación al láser y haz de electrones	Proceso relativamente económico, espesor de corte muy alto en comparación a otros procesos
Desventajas	Solo se procesa materiales conductores de electricidad - Se producen grietas microscópicas en las superficie de trabajo	La parte superior de la pieza presenta una mayor abertura que la parte inferior por el choque del chorro - Los polvos abrasivos no se pueden reutilizar, no se puede cortar materiales muy frágiles	Todos los cortes deben realizarse en vacío - Costos de equipos relativamente altos en comparación al plasma y oxicorte, proceso de piezas relativamente pequeñas	Costo de equipos relativamente altos en comparación al haz de electrones- Dificultad de corte para materiales reflectantes como el aluminio y cobre, las superficies deben ser mate y sin pulir ya que reflejan menos	Se presenta oxidación y formación de escamas	Velocidades de corte bajas en comparación a otros sistemas, se requiere tiempo de precalentamiento
Aplicaciones	Fabricación de herramientas de prensado - Forjas de molde - Matrices de extrusión, taladrado de agujeros microscópicos	Cortar y rebordar tableros de automóvil, corte y rebanado de alimentos, corte de zapatas para frenos, corte de suelas para zapatos, corte de fibra de vidrio para automóviles	Inyectores de combustible para cohetes -Toberas de inyección para motores diésel - Troqueles de trefilado - Hileras para la fabricación de fibras sintéticas	Orificios de purgas para cubiertas de bombas de combustible, tratamientos térmicos de pequeña escala en metales y cerámicos con el objeto de modificar sus propiedades mecánicas y tribológicas, en la industria electrónica y automotriz	Corte de perfiles y placas para estructuras metálicas, corte de formas para adornos, corte de flejes para distintos usos	Corte de perfiles y placas para estructuras metálicas, corte de formas para adornos, corte de flejes para distintos usos, corte de lingotes de acero de altos espesores

* Para espesores en el rango de 4 a 35 mm

**Para espesores mayores a 60 mm la rugosidad del oxicorte es mayor en comparación al corte con plasma

Definir el mejor proceso de corte depende del material que se va a cortar, del espesor del material y de que tan rápido tiene que hacerse el corte. Los láseres y chorros de agua brindan el más alto grado de precisión de partes a ser cortadas.

El propósito de este trabajo es diseñar y construir una máquina de corte por plasma basándose en el control numérico computarizado. Tomando en consideración la velocidad de corte, calidad de acabados en el proceso, entre otros; con la finalidad de contribuir al conocimiento del sector industrial y académico.

La generación de códigos se realizará por medio de una PC; y a través de un software de control se pretende que el sistema realice desplazamientos automáticos de la antorcha en la mesa de soporte. Todo esto permitirá obtener piezas metálicas con un mecanizado rápido y sencillo. La mesa de la máquina tendrá un tamaño capaz de cubrir el corte de planchas de 2.44x1.22 metros sin dificultad. Se diseñarán y seleccionarán los sistemas de desplazamientos longitudinales, transversales y verticales.

El software a utilizar es clave para el control de la máquina. La máquina generadora de plasma es CEBORA, por lo tanto se debe considerar sus especificaciones durante el diseño. El diseño de sujetador de la antorcha es esencial para realizar cortes precisos la adecuada selección de los actuadores, serán dados por los parámetros de corte de la máquina de plasma.

1.2. AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE CORTE

Después de la segunda guerra mundial, se hizo evidente la necesidad de industrialización de los países con el objetivo de reactivar sus economías. Los trabajos en serie llevaron a establecer métodos que ayuden a incrementar la producción. Uno de estos métodos fue el copiar las partes por medio de plantillas, pero no era muy confiable. John T. Parsons, de Estados Unidos, utilizó tarjetas perforadas que contenían información de coordenadas X y Y que servían para controlar una máquina herramienta que procesaba hojas de rotor de helicóptero. En 1952, Alfred Herbert Limited fabricó su primera máquina NC con tres ejes controlados. En 1953, Air France Industries desarrollo también su propia máquina NC. En 1964 y 1965, Japón también ideó sus propios medios para controlar

máquinas herramientas automáticamente; siendo el que dominaba este tipo de tecnología, hasta que Rusia se convirtió en el productor más grande de máquinas NC y desarrolló su tecnología hasta conseguir las máquinas CNC Y DNC (6 pág. 504).

En general, en los procesos de fabricación de piezas, interviene el corte, debido a que en el mercado existen materiales con medidas estándar y por la gran diversidad de elementos a construir es necesaria la aplicación de distintos métodos de corte de material de acuerdo al proceso y destino de la pieza a producirse. La automatización tiene los siguientes objetivos fundamentales (3 pág. 1148).

- Integrar diversos aspectos de las operaciones de manufactura con el fin de mejorar la calidad y la uniformidad de los productos, minimizar tiempos y esfuerzos de los ciclos y reducir los costos por mano de obra;
- Mejorar la productividad reduciendo los costos de manufactura mediante un mejor control de la producción. Las partes que se cargan, alimentan y descargan en las máquinas son identificadas, logrando una más eficaz organización de la producción ;
- Los procesos de producción son repetitivos, con lo que se logra mejorar las propiedades de calidad del producto;
- Reducir la participación humana, debido a que la fatiga de operador puede generar errores en las partes a producirse;
- Elevar el nivel de seguridad del personal;
- Minimizar el espacio físico en la planta de producción, lo cual da lugar a mejorar la distribución de espacio y el movimiento de materiales y equipos auxiliares

En automatización existen dos conceptos básicos que, dependiendo de su naturaleza, son destinados a diferentes tipos de producción. Uno de los conceptos es la automatización rígida, conocida también como automatización de posición fija, donde las máquinas están destinadas a fabricar un producto estándar. Sin embargo, el tamaño del producto y los parámetros de procesamiento se pueden cambiar, estas son personalizadas y carecen de flexibilidad. Una característica fundamental de las máquinas con automatización

rígida es que son costosas, su uso económico es justificado con la producción en masa.

El otro concepto es la automatización por programación, conocida también como automatización flexible. Lo que la hace flexible es el uso de control mediante computadora. La automatización programable hace posible la fabricación de piezas de distinta forma y tamaño mediante la reprogramación de control numérico (NC), que controla los movimientos de los mecanismos de la máquina por medio de instrucciones codificadas. El control numérico tiene las siguientes ventajas sobre los métodos convencionales de control de las máquinas (3 págs. 1159,1160):

- Se mejora la flexibilidad de la operación, así como la capacidad de producir formas complejas con buena precisión dimensional, repetitividad, reducción en pérdida por desperdicios, altas velocidades de producción y calidad de los productos;
- Se reducen costos por deterioro de herramientas, debido a que no se requieren plantillas ni otros soporte fijos;
- Con cada configuración de programación se pueden realizar más operaciones y el tiempo requerido para el reinicio y maquinado es menor;
- Se pueden realizar programas con rapidez y es posible reutilizar cuando se necesite;
- Es posible producir prototipos con rapidez;
- El operador tiene más tiempo para atender otras tareas en el área de trabajo.

La principal limitación de las máquinas NC es el costo relativamente alto del equipo y el mantenimiento especial requerido. Un daño en estas máquinas representa un alto costo de arreglo, razón por la cual es necesario el mantenimiento preventivo programado.

Específicamente para el corte de metales se han desarrollado distintos métodos de corte ya sean manuales o semiautomáticos, que dependiendo de su forma se clasifican según la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Clasificación de perfiles metálicos según su forma.

Tipo	Perfil
Abiertos	Ángulos, platinas, perfiles W o tipo I, tipo T, conformados en frío: correas G, Tipo C, omegas, perfiles UV, entre otros
Cerrados	Rectangulares, cuadrados, redondos
Sólidos	Rectangulares, cuadrados, redondos
Planos	Planchas con distintas dimensiones

El método desarrollado para cortar ángulos y platinas es la cizalla hidráulica, debido a que el operador manipula la parte hasta conseguir la longitud deseada; se trata de un sistema semiautomático. Esta máquina también se la conoce como cizalla universal porque también se puede perforar los perfiles. Otra forma de cortar este tipo de perfiles es con la procesadora automática de ángulos. Por medio de un computador se puede dar las órdenes para el corte del perfil a determinadas dimensiones. Para perfiles de mayores dimensiones sean abiertos o cerrados el método automático desarrollado son las sierras circulares o sierras de cinta; tal máquina tiene la capacidad de cortar elementos abiertos, cerrados y sólidos de grandes dimensiones para elementos estructurales. Existen métodos de corte por medio de plasma automático, mostrado en la figura 1.1. Este sistema posee su equipo de generación del arco de plasma mostrado en la figura 1.2 y es totalmente automático. Otro método es el tronzado, donde se usan discos de corte. Este método en especial se caracteriza por cortar elementos de pequeña a mediana dimensión sean abiertos, cerrados o sólidos.



Figura 1.1. Corte automático de perfiles mediante plasma (7).



Figura 1.2. Equipo de generación de arco de plasma (8).

Los elementos tipo plancha son cortados con métodos semiautomáticos o automáticos, con desprendimiento de material como el método de inyección de chorro de agua y por la fundición de parte de su material como son el plasma y oxiacorte. El corte de planchas con cizalla o guillotina semiautomática se limita al espesor de las planchas, siendo este el que determina la capacidad y el tamaño de la máquina, no se puede cortar bordes curvos; es decir, solo se limita a realizar cortes rectos y en una sola dirección.

El proceso de corte con láser es similar al corte con plasma u oxiacorte. La diferencia es que se obtienen cortes mucho más precisos y de geometrías aún más complejas. El método de corte con láser debe estar protegido en cámaras especiales por la radiación que emite durante el proceso. El método similar al láser es el corte con haz de electrones, se limita a espacios físicos reducidos debido a que debe estar aislado del ambiente en cámara de vacío, razón por la que es aplicado al micro corte.

Para el caso de corte con plasma y para el oxiacorte existe un método semiautomático que controla el desplazamiento de la antorcha de corte en un solo sentido, como el mostrado en la figura 1.3; es decir, aún se necesita la intervención del operador para controlar el corte. Este método se limita a cortar piezas sencillas de bordes rectos y curvas no complejas.



Figura 1.3. Sistema semiautomático de corte con plasma (9).

En la figura 1.4, se indica un sistema de corte automático para tubos, por medio de arco de plasma. Los rodillos hacen girar al tubo, mientras que en la unidad de deslizamiento hace desplazar la antorcha de plasma; estos movimientos son producidos mediante controladores de los motores, que a su vez responden órdenes de codificaciones CNC, emitidos por un computador. En la figura 1.5, se indica los cortes que se obtienen por este método, usado en tubería.

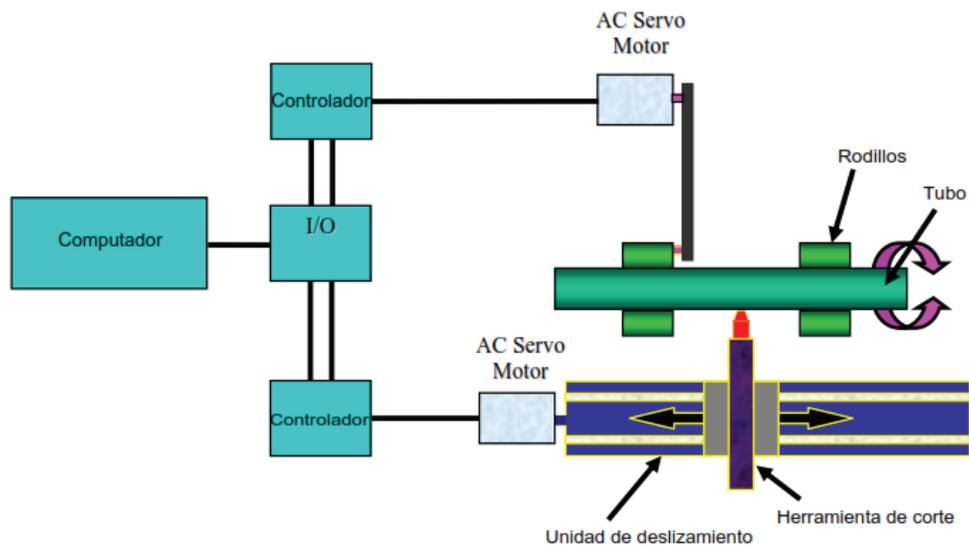


Figura 1.4. Esquema de la configuración del sistema de corte de tubos (10).

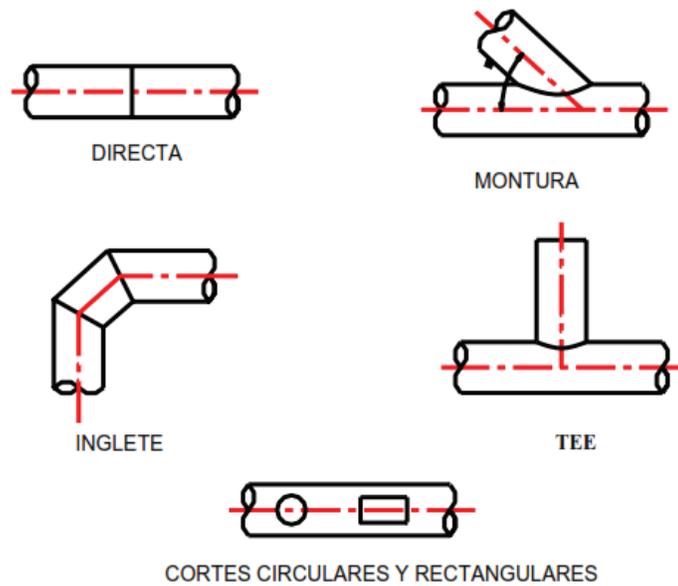


Figura 1.5. Juntas típicas en tubería y formas de corte (10).

La complejidad del sistema dependerá del tipo de elementos a cortarse. En la figura 1.6, se muestra una mesa automática de corte con plasma. El método permite cortar piezas muy complejas y con mayor precisión. En este tipo de máquinas también se puede integrar el proceso de taladrado. Es decir, se perforará la pieza según la necesidad antes de cortarla. También se puede incluir varias antorchas de corte, logrando un proceso más versátil debido a que se pueden realizar cortes paralelos y de varias piezas al mismo tiempo. Este tipo de máquina también puede utilizar el método de oxicorte.



Figura 1.6. Sistema automático de corte de planchas mediante plasma (11).

En resumen existen varios métodos para cortar determinado material. Con algunos de estos se pueden realizar cortes a varios tipos de perfil. Lo que delimita el uso de máquinas para el corte es la forma, el espesor y tipo de perfil del elemento a ser procesado; un limitante importante a considerarse es la complejidad de la pieza. En la tabla 1.3 se comparan varios tipos de máquinas destinadas a cortar material, la energía con la que se efectúa el corte, tipos de control, tipo de material de las piezas, entre otros.

Tabla 1.3. Comparación de métodos de corte.

Máquina herramienta	Energía de corte			Tipo de control existente		Tipo de material			Tipo de perfil a cortar				Limitante dimensional		Rango de aplicación dimensional			Tipo de corte		
	Eléctrica	Mecánica	Térmica	Automático	Semiautomático	Metálico	No metálico	Compuesto	Abierto	Cerrado	Sólido	Plano	Forma	Espesor	Pequeña	Mediana	Grande	Lineales	Curvos	
Cizalla universal																				
Perforadora de ángulos																				
Cortadoras de cinta o de sierra																				
Tronzadora																				
Electro-erosionadora																				
Cortadora por chorro de agua																				
Cizalla hidráulica para planchas																				
Plasma u oxicorte																				
Láser																				
Haz de electrones																				

Rango de aplicación:

Pequeña: construcción de microcomponentes

Mediana: construcción de elementos mecánicos y matrices

Grande: construcción de partes de edificaciones (puentes, edificios)

La selección del tipo de método a usar dependerá en gran medida de aspectos importantes como:

- Grado de producción
- Nivel de precisión
- Tipo de perfil o elemento
- Complejidad de las piezas
- Personal calificado
- Costo del sistema

1.3. SISTEMAS DE CORTE CON PLASMA

En 1927 el norteamericano premio Nobel en química Irving Langmuir fue el primero que uso el término plasma para describir un gas ionizante. Junto a su colega, el físico Lewi Tonks, Langmuir investigó la física y química de los filamentos del tungsteno de las bombillas con el fin de encontrar una manera de extender la vida de estas. En el proceso ellos desarrollaron la teoría del protector de plasma (plasma sheaths), que consiste en la capa límite que se forman entre plasmas ionizados y las superficies sólidas (12 pág. 4).

En los años 40 se introdujo el primer proceso con protección gaseosa empleando un electrodo no consumible de wolframio y helio como gas protector; recibió el nombre de TIG (Tungsten Inert Gas). En 1954, científicos descubren que al aumentar el flujo del gas y reducir la abertura de la boquilla utilizada en la soldadura TIG, se obtiene un chorro de plasma. Este chorro es capaz de cortar metales, lo que dio origen al proceso de corte mediante plasma conocido en la actualidad.

El principio de corte consiste en forzar el flujo de plasma a través de una boquilla, logrando transferir un arco, cuando la energía eléctrica fluye desde un electrodo que no se derrite o llamado también cátodo a la pieza de trabajo o ánodo. De esta manera se obtiene un chorro de plasma a temperaturas cercanas a los 20000 grados (13). Este método se utiliza específicamente para cortar materiales que son eléctricamente conductores. La velocidad del gas aumenta considerablemente debido al estrangulamiento, lo que produce un barrido del material líquido produciendo el corte. Un esquema de este proceso es mostrado en la figura 1.7.

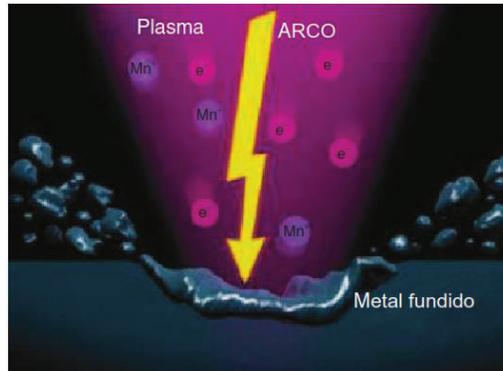


Figura 1.7. Esquema del proceso de evaporación del material cortado, incluyendo la generación de gotas de metal fundido debido a sobrecalentamiento incontrolado de la superficie (12 pág. 46).

El proceso de corte inicia cuando un arco piloto se enciende entre la boquilla y el electrodo, a causa de la aplicación de un alto voltaje. El arco piloto prepara el espacio entre la antorcha de plasma y la pieza de trabajo a causa de la ionización parcial, el arco de plasma principal se enciende a través de un incremento de energía. En la zona de corte el material se funde y vaporiza parcialmente debido a la alta energía térmica del arco y el gas de plasma, el material fundido es expulsado de la ranura el corte por la energía cinética del gas de plasma. En comparación con el proceso de oxicorte, aproximadamente el 70% de la energía térmica de corte es generada por la combustión del hierro, en el corte mediante plasma la energía se produce eléctricamente. Los gases utilizados para el corte son: argón monoatómico y/o gases diatómicos, tal como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, y combinaciones de los mismos así como aire purificado, que se utiliza como el gas de plasma y también como el gas de corte.

1.3.1. Equipamiento para el corte mediante plasma

- La fuente de energía del plasma es la que suministra el voltaje de funcionamiento y la corriente de corte tanto para el arco auxiliar y principal. Sin carga el voltaje de la fuente varía entre 240 a 400 V. La fuente de energía contiene el arco piloto o arco auxiliar para el sistema de encendido, el que provoca la ionización del espacio entre la boquilla y la pieza de trabajo produciendo el arco de plasma o arco principal.

- Electrodo de la antorcha y boquilla: de su diseño depende en gran medida la calidad del borde cortado. Tanto el electrodo como la boquilla de plasma tienen una vida útil limitada. La vida del electrodo depende de la intensidad de corriente de corte, número de encendidos, tipo de gas plasma a utilizarse, la disipación de calor. El material de los electrodos pueden ser tungsteno, circonio o hafnio. Los electrodos de tungsteno se utilizan con gases de plasma inertes y mezclas de los mismos, o con los de baja reactividad; mientras que los electrodos de circonio o hafnio cuando se utilizan gases de plasma como oxígeno puro, o gases que contienen oxígeno. La selección adecuada del electrodo disminuye la tendencia a erosionar, incrementando la vida útil del electrodo. La característica de estos materiales es que forman naturalmente una capa protectora que se funde a temperaturas más altas en comparación al material que encierra interiormente. Los electrodos son incrustados en una carcasa con alta conductividad térmica, la cual se la enfría muy intensamente. Cuando se utiliza oxígeno como gas de plasma se puede incrementar la vida útil del electrodo mediante el uso de dos gases: el encendido con un gas oxidante bajo y el proceso de corte con el oxígeno. En la tabla 1.4, se muestra los valores característicos de las piezas consumibles utilizados con quemadores de plasma.

Tabla 1.4. Datos característicos de las piezas consumibles utilizados con quemadores de plasma (14 pág. 9).

Material	Símbolo	Temperatura de Fusión [°C]	Gas usado	Conductividad térmica a 20 °C [W/mK]
Tungsteno	W	3400	Ar	≈ 174
Oxido de tungsteno	WO ₃	1473	Ar/H ₂	
Zirconio	Zr	1852	Aire	≈ 22
Oxido de Zirconio	ZrO ₂	2700		≈ 2.5
Nitruro de Zirconio	ZrN	2982		
Hafnio	Hf	2227	O ₂	
Oxido de Hafnio	HfO ₂	1700	Aire	≈ 29
Nitruro de Hafnio	HfN	3305		
Cobre	Cu	1083		
Oxido de Cobre	Cu ₂ O	1235	Todos	≈ 400
Plata	Ag	961	Todos	≈ 429

- Pieza de trabajo: como se indicó antes el material que se va a cortar con este proceso debe ser conductor eléctrico, debido a que la pieza de trabajo

forma parte del circuito eléctrico. El soporte de la pieza de trabajo debe ser diseñado de tal manera que permita un flujo continuo de corriente.

- Suministro de gas: los sistemas de corte mediante plasma deben operar con los siguientes gases: inertes, reactividad reducida, reactividad baja, activos, o la mezcla de estos; las propiedades de los gases se muestran en la tabla 1.5. En general el suministro de gas se refiere a todos los gases o mezclas de gases que pueden ser utilizados para la generación del arco de plasma y para el proceso de corte. El arco de plasma consta de dos etapas: la etapa de encendido y de corte. Por lo tanto, el arco de plasma se descompone en el gas de ignición y el gas de corte, los que difieren en términos del tipo de gas y la cantidad de flujo:
 - a) Gas de ignición, es el que facilita el encendido del arco de plasma y que por medio de este se puede incrementar la vida útil del electrodo.
 - b) Gas de corte, este gas es el que se utiliza durante el corte de la pieza mediante arco de plasma, y permite lograr una calidad óptima de los bordes cortados.
 - c) Gas auxiliar o secundario, se utiliza con el objetivo de encerrar el chorro de plasma, con el fin de aumentar la calidad del borde cortado y a su vez protege la boquilla cuando el corte se efectúa bajo agua.

Tabla 1.5. Principales propiedades de gases de corte (14 pág. 16).

Propiedad	N ₂ (N)	H ₂ (H)	O ₂ (O)	Ar	Aire
Energía de ionización [eV]	15.5(14.5)	15.6(13.5)	12.5(13.6)	15.8	34
Energía de disociación [eV]	9.8	4.4	5.1	-	-
Peso atómico [U]	14	1	16	40	14.4
Conductividad térmica en 0°C [W/mK]	24.5	168	24.7	16.6	24.5

- Sistema de circulación de refrigerante, debido a la alta temperatura, el corte mediante plasma necesita un efectivo enfriamiento. El fluido de enfriamiento puede ser agua o gas; antorchas que funcionan con 100 A o más generalmente se usa agua.
- Sistema de apoyo, las dimensiones dependen del tamaño, espesor y peso del metal a cortarse. Para disminuir las emisiones de gases y partículas de

metal generadas por el proceso se puede integrar un sistema de escape de gases y un recolector de partículas en un depósito de agua que se ubica bajo la mesa de corte. Los equipos básicos de los sistemas de corte están compuestos de los elementos que se muestran en la figura 1.8.

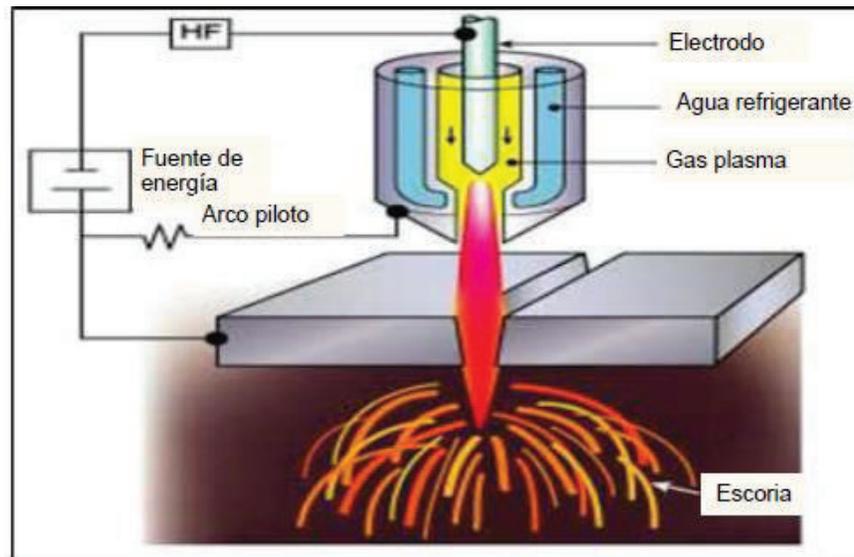


Figura 1.8. Esquema de sistema de corte mediante plasma (15).

1.3.2. Criterios de selección de los gases

Con el objetivo de evitar un procesamiento posterior al corte mediante plasma, la selección de gases debe tomar en cuenta las propiedades físicas y mecánicas para lograr cortes de buena calidad. El arco de plasma debe tener alto contenido de energía, buenas propiedades conductoras de calor y alta energía cinética. Las propiedades químicas reductoras, neutrales, comburentes, también tienen un gran impacto en la calidad de corte. Con lo indicado se puede afectar las siguientes propiedades de calidad: cortes perpendiculares, rugosidad, redondeo de borde superior, soldabilidad, formación de rebabas. Los gases de plasma utilizados son: argón, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, y el aire, en términos de ventajas y desventajas, ninguno es el óptimo, por lo tanto en la mayoría de los casos una mezcla de estos son utilizados. La descripción de propiedades de los gases, se indica en el anexo 1. Las propiedades físicas a tenerse en cuenta para la selección de un gas son las siguientes:

- Energía de ionización de gases mono – atómicos
- Energía de disociación de gases multi – atómicos
- Conductividad térmica
- Reactividad química
- Peso atómico

Como se indicó en los párrafos anteriores, el gas a utilizarse, las mezclas y sus porcentajes de contenido en gases, afecta directamente a la velocidad y calidad de los cortes, así como también el tipo de gas utilizado como plasma depende del material a cortarse. Otros son utilizados solamente como gas de ignición por las propiedades físicas, químicas y mecánicas no aptas para utilizar como gas de corte o gas de plasma. En la tabla 1.6 se muestra algunas recomendaciones de mezcla de gases y su impacto en la calidad de corte. En la tabla 1.7; se dan valores mínimos de pureza de los gases que se usan en el corte mediante plasma.

Tabla 1.6. Recomendaciones de mezcla de gas y su impacto en la calidad del borde cortado (14 pág. 20).

Material / espesor	Gas de Plasma	Gas Secundario	Comentario
Acero estructural 0.5 a 8 mm	Oxígeno	Oxígeno o nitrógeno u oxígeno/nitrógeno	Tolerancia de perpendicularidad similar al láser
			Liso, superficie libre de rebabas
Acero estructural 4 a 50 mm	Oxígeno	Nitrógeno o aire u oxígeno/nitrógeno	Sobre 25 mm tolerancia de perpendicularidad similar al láser
			Superficie de corte lisa
			Bordes libre de rebabas sobre 20 mm
Acero de alta aleación de 1 a 6 mm	Nitrógeno	Nitrógeno o nitrógeno/hidrógeno	Baja tolerancia de perpendicularidad
			Lisa, superficie libre de rebabas
Acero de alta aleación de 5 a 45 mm	Argón/hidrógeno /nitrógeno	Nitrógeno o nitrógeno/hidrógeno	Baja tolerancia de perpendicularidad
			Cortes lisos
			Bordes libre de rebabas sobre 20 mm
Aluminio de 1 a 6 mm	Aire	Nitrógeno o nitrógeno/hidrógeno	Cortes casi verticales
			Cortes libre de rebabas
			Rugoso, granoso
Aluminio de 5 a 40 mm	Argón/hidrógeno /nitrógeno	Nitrógeno o nitrógeno/hidrógeno	Cortes casi verticales
			Bordes libre de rebabas sobre 20 mm
			Rugoso, granoso

Tabla 1.7. Valores mínimos de pureza de los gases de corte de plasma (14 pág. 21).

Oxígeno	Argón	Hidrógeno	Nitrógeno	Aire
99.5%	99.995%	99.5%	99.999%	Seco, libre de impurezas, agua y aceite, máximo tamaño de partícula 0.1 um, clase 1 acorde con ISO 8573, máximo contenido de aceite residual: 0.1 mg/m ³ , clase 2 máximo punto de rocío: +3°C, clase 4.

1.3.3. Técnicas de corte mediante plasma

Las técnicas de corte mediante plasma buscan mejorar continuamente con el objetivo de reducir la contaminación ambiental, incrementar la capacidad de corte y la calidad del borde cortado. Al hablar de calidad de los cortes se refiere a conseguir planos paralelos en el borde cortado, que requieran poco o ningún proceso posterior. Dependiendo del material, espesor del material a cortar, modo de salida generada por la fuente de plasma se encuentran disponibles algunas variaciones.

1.3.3.1. Corte mediante plasma convencional

La antorcha es sencilla en comparación a otros métodos y es diseñada para un solo gas de corte; los gases utilizados generalmente son: nitrógeno, oxígeno o mezclas argón – hidrógeno. El arco de plasma es forzado por el diámetro interior de la boquilla, el gas plasma se desplaza tangencialmente alrededor del electrodo. Según la velocidad de corte, la antorcha se enfría con aire o agua. Con el sistema convencional de corte por plasma se puede cortar espesores de hasta 160 mm. El esquema de la antorcha se muestra en la figura 1.9.

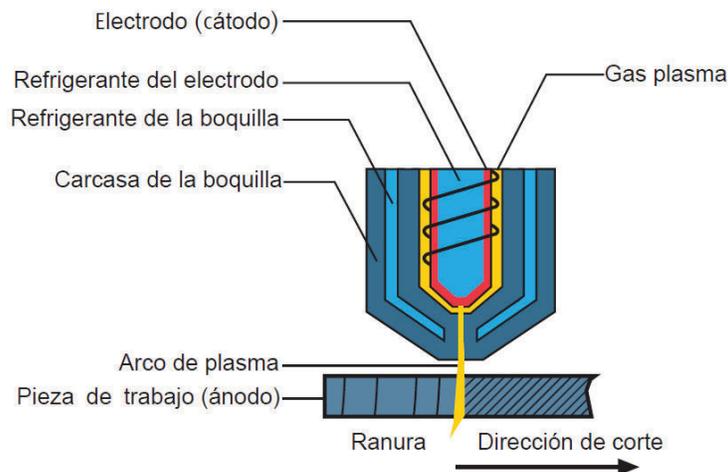


Figura 1.9. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma convencional o corte mediante plasma seco (14 pág. 12).

1.3.3.2. Corte mediante plasma con medio secundario de agua

Con el objetivo de crear una atmósfera específica a su alrededor, se inyecta un medio secundario que rodea al arco de plasma. El agua se descarga como un escudo en forma de aerosol, es descompuesta por el arco de plasma. Debido a su efecto reductor, el hidrógeno formado por el proceso hace la superficie cortada sea brillante. Este método es preferiblemente aplicado para el corte de aluminio y aceros de alta aleación de hasta 50 mm de espesor. El esquema de este tipo de antorcha se muestra en la figura 1.10.

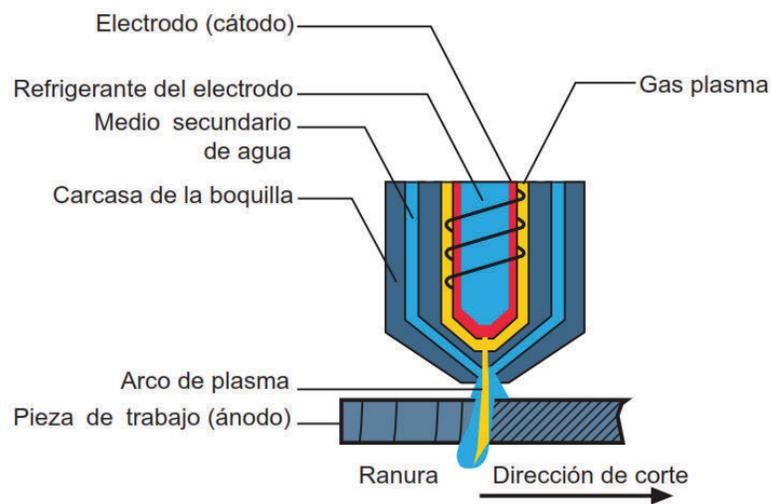


Figura 1.10. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con medio secundario de agua (14 pág. 12).

1.3.3.3. Corte mediante plasma con medio secundario de gas

La alimentación de un gas como medio secundario hace que el arco de plasma se forcé aún más en su salida y crea un atmósfera específica a su alrededor, lo que conlleva al incremento de potencia del chorro, calidad de corte e incremento de la velocidad. Este medio secundario se lo conoce como: gas secundario, gas de blindaje, gas protector y gas remolino. Con este método se puede cortar hasta 75 mm de espesor. El esquema de este tipo de antorcha se muestra en la figura 1.11.

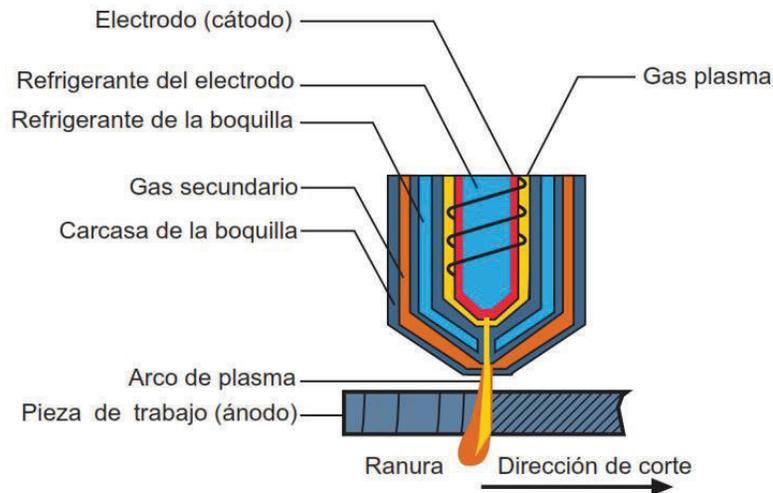


Figura 1.11. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con medio secundario de gas (14 pág. 12).

1.3.3.4. Corte mediante plasma con inyección de agua

Este método de corte es forzado radialmente por la inyección de agua. El agua se evapora en pequeñas cantidades, el resto enfría la boquilla y la pieza de trabajo. Permite una alta velocidad de corte y sin distorsión del borde cortado con pocas rebabas. Además, extiende la vida útil de los consumibles. Un método similar es inyectar el agua en vórtice, lo que permite tener un borde de corte aproximadamente perpendicular, mientras que la inyección radial se obtiene aproximadamente de 5 a 8°. Preferiblemente se utiliza electrodos planos para este método, y es más utilizado para corte bajo agua y se pueden cortar placas de metal de 3 mm a 75 mm. El esquema de este tipo de antorcha se muestra en la figura 1.12.

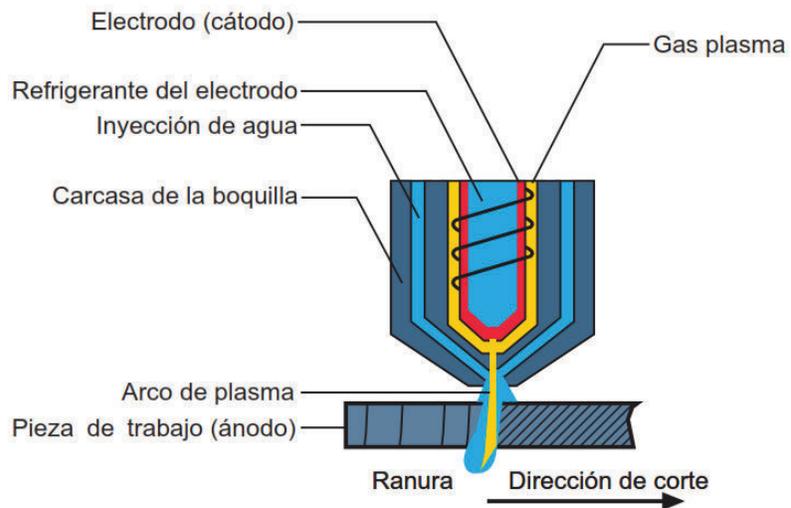


Figura 1.12. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma con inyección de agua (14 pág. 13).

1.3.3.5. Corte mediante plasma con incremento de la constricción

El método de corte consiste en incrementar la densidad de arco con boquillas de mayor constricción. El arco de plasma de este sistema permite una mayor precisión. Se puede cortar metales con espesores de 0.5 mm a 25 mm. El esquema de este tipo de antorcha se muestra en la figura 1.13.

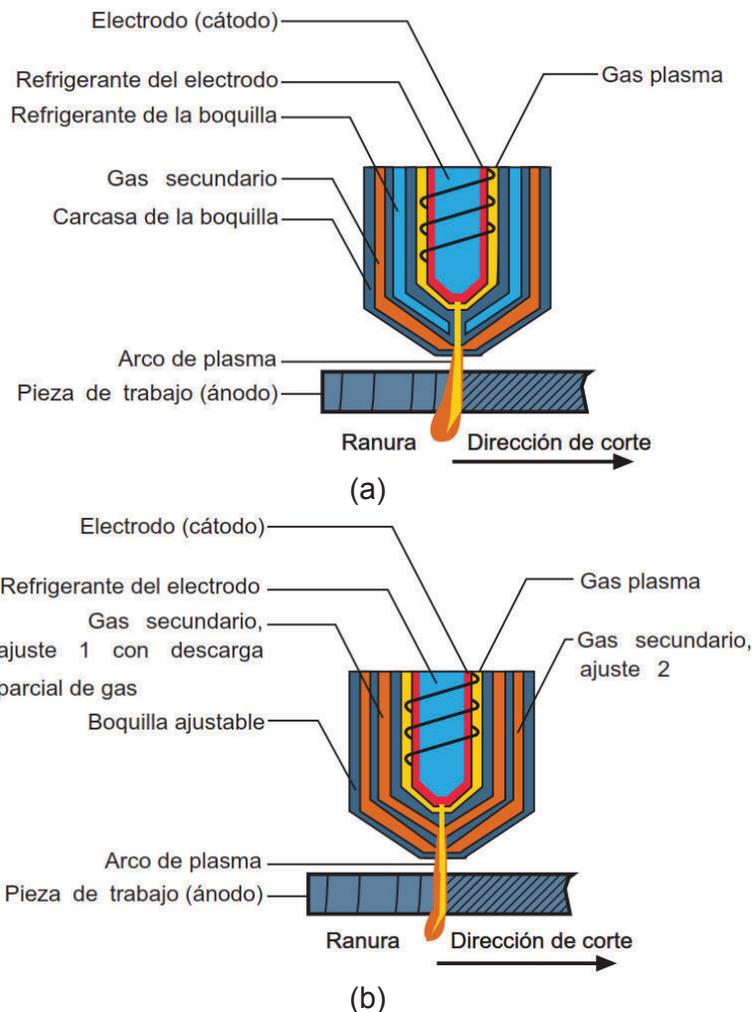


Figura 1.13. Esquema de la antorcha de corte mediante plasma: (a) con incremento de la constricción, (b) con incremento de constricción ajustable (14 pág. 13).

1.3.4. Calidad del proceso de corte por plasma

Según la norma AWS C4.6M: 2006 Cortes térmicos - Clasificación de cortes térmicos - Especificaciones Geométricas y Tolerancias de Calidad, los parámetros de calidad son los que se identifican en las figuras 1.14 a 1.18.

- Tolerancia perpendicular y angular (u)
- Promedio de pico a la profundidad de valle de cinco grupos consecutivos de perfiles (Rz5)
- Línea de arrastre (n)
- Fusión en el borde superior (r)

- Posible formación de rebabas o gotas de metal fundido en la parte inferior del borde de corte

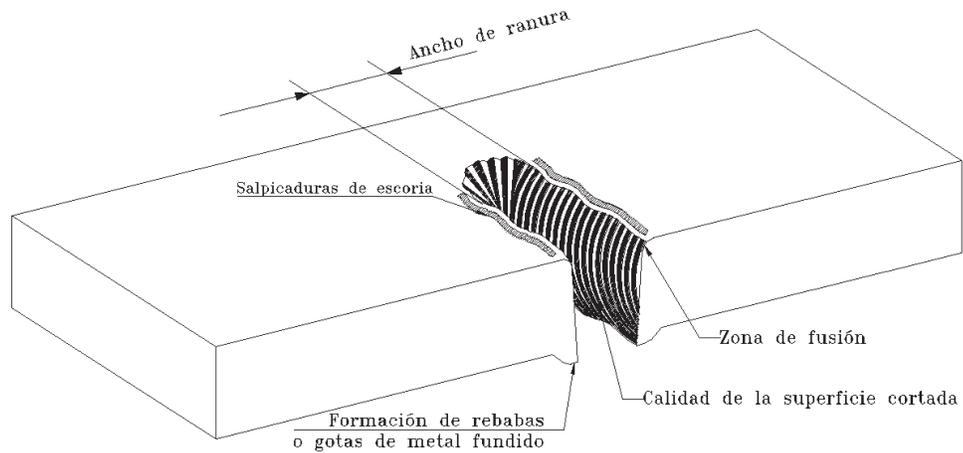


Figura 1.14. Parámetros de calidad del corte mediante plasma.

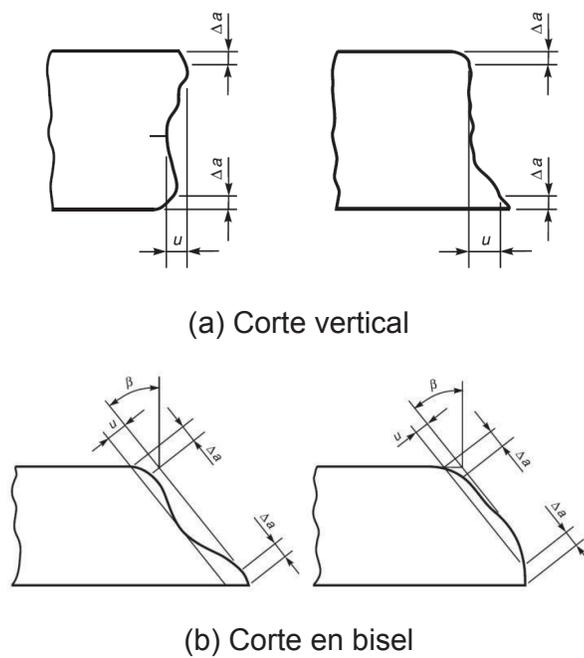


Figura 1.15. Tolerancia perpendicular y angular (5 pág. 5).

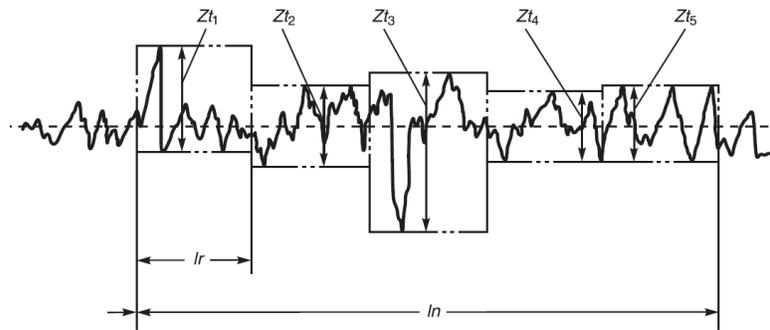


Figura 1.16. Promedio de piso de altura al valle: Zt_1 a Zt_5 , representa la altura del pico al valle de un grupo perfiles; l_n , representa la longitud de evaluación; l_r , representa la longitud de muestreo para cinco grupos o $l_n/5$ (5 pág. 6).

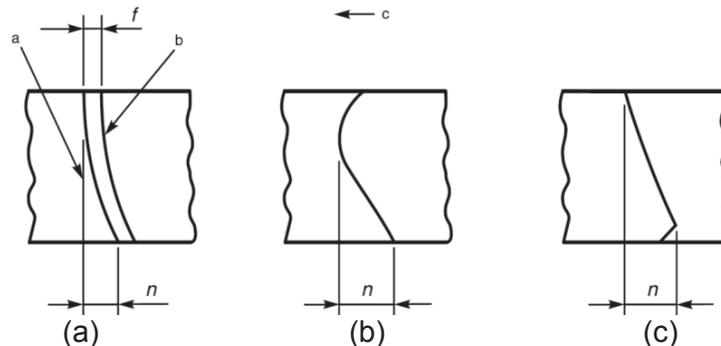


Figura 1.17. Líneas de arrastre formadas durante el corte: a, línea de referencia; b, línea de arrastre; c, dirección de avance de corte (5 pág. 4).

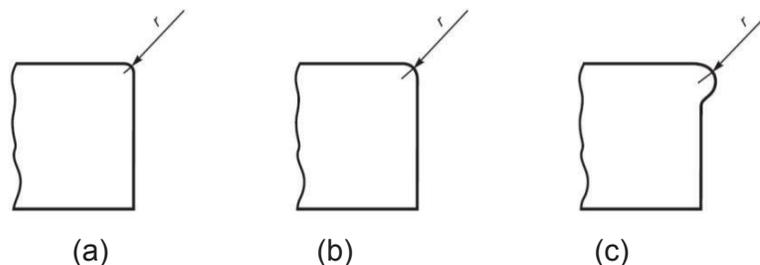


Figura 1.18. Fusión de borde superior: (a) borde agudo; (b) borde fundido; (c) corte con borde saliente (5 pág. 6).

La tolerancia perpendicular y angular es la distancia entre dos líneas paralelas, tangentes al perfil que se inscribe en la superficie y el ángulo de corte. La tolerancia perpendicular y angular depende en gran medida del espesor del material. En la figura 1.19 se dan las dimensiones de tolerancias dimensionales para cortes perpendiculares y angulares. La tolerancia de rugosidad superficial

también depende del espesor de corte. Los datos de rugosidad se muestran en la figura 1.20.

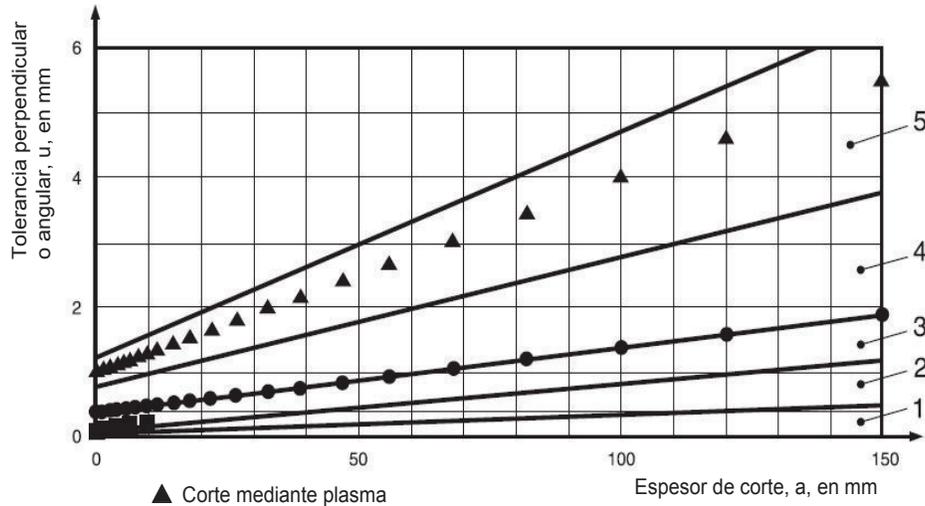


Figura 1.19. Tolerancia perpendicular o angular para espesores de hasta 150 mm (5 pág. 22).

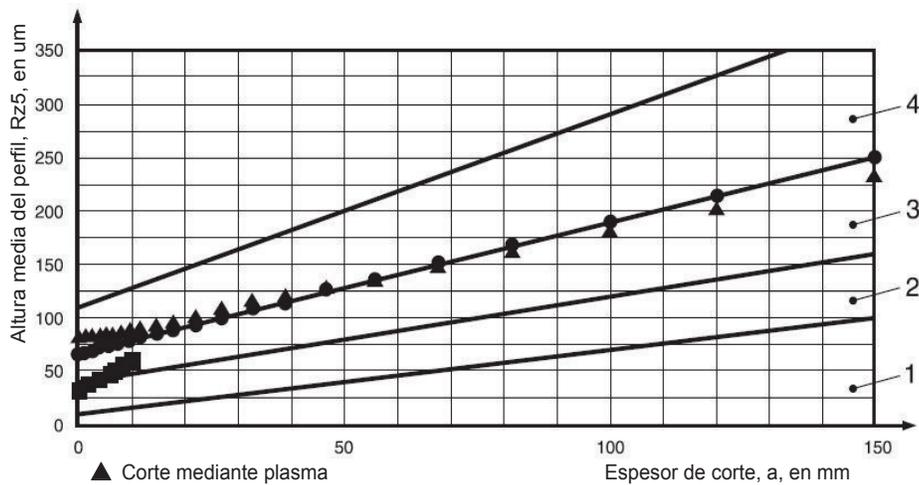


Figura 1.20. Tolerancia de rugosidad para espesores de hasta 150 mm (5 pág. 23).

En el proceso de corte por arco de plasma, la presión del gas es un parámetro significativo, el incremento en el flujo de gas plasma mejora de la calidad de corte para todos los gases, debido a que aumenta la densidad de energía. La rugosidad superficial y la conicidad se ven afectados principalmente por la altura de corte, mientras que la zona afectada por el calor está influenciada principalmente por la

corriente de corte. Sí el oxígeno es usado como gas plasma la reacción de oxidación se producirá y da lugar a mayores velocidades de alimentación y cortes de mejor calidad. Para el corte de placas delgadas, se debe disminuir la corriente y la tensión de corte; mientras que la velocidad de corte se debe aumentar para mejorar la rugosidad de la superficie (15).

1.3.5. Recomendaciones para una segura operación de corte con arco de plasma

Además de radiación de alta energía que el arco de plasma te genera, el intenso calor del arco también genera grandes cantidades de gases y vapor del metal fundido. El proceso de arco de plasma produce rayos ultravioleta e infrarrojos, que pueden dañar los ojos y quemar la piel si no se protegen adecuadamente (16). En la tabla 1.8, se indican los potenciales peligros del proceso de corte mediante el arco de plasma.

Tabla 1.8. Potenciales peligros del proceso de corte mediante el arco de plasma.(16).

Causa	Síntoma
Radiación UV	Quemaduras en la piel y en los ojos. Las molestias en los ojos son dolorosas, a menudo con una sensación arenosa, ojos rojos, sensibilidad a la luz.
Rayos X	Daños a los tejidos del cuerpo, cáncer, leucemia, reducción de la fertilidad, muerte prematura.
Compuestos de cromo y níquel	Causante de cáncer.
Vapores de metal	Afección a las vías respiratorias, liberan manganeso, cromo, cadmio, plomo, níquel u otras sustancias peligrosas. Pueden causar fiebre, con síntomas similares a la gripe. Algunas horas después de la inhalación del humo de la persona se queja de cansancio, dolor de cabeza, dolores musculares, sed, dolor de garganta, tos, ocasionalmente sensación de opresión en el pecho. La inhalación de cadmio causa inflamación aguda de los pulmones.

El uso de e quipo de protección personal sugerido incluyen: respiradores, orejeras, prendas de vestir, guantes, botas, cascos, protección para los ojos y de la cara. El uso de ropa adecuada incluyendo guantes hechos de material ignífero y duradero para proteger la piel del operador y la de otros trabajadores. La zona de trabajo debe estar ventilada y separada de otros procesos con materiales no inflamables y con señales de precaución, prohibición e información en lugares cercanos al proceso de corte. Los filtros de protección recomendados para la vista se indican en la tabla 1.9.

Tabla 1.9. Recomendaciones de grada de opacidad de filtros para la vista para varias corrientes de arco (16).

Corriente de Arco (A)	Número de opacidad del protector mínima	Numero de opacidad del protector sugerida
Menor a 20	4	4
20 - 40	5	5
40 - 60	6	6
60 - 80	8	8
80 - 300	8	9
300 - 400	9	12
400 - 800	10	14

Como dato importante se proporciona los parámetros ecológicos, en el proceso de corte mediante plasma, como medio de gas plasma el aire. Los datos de corte son los siguientes: voltaje de arco 275 V, corriente de arco 180 A, placa de acero de 16 mm, velocidad de corte 2.6 cm/s (17). Estos parámetros sirven como referencia para el proceso de corte indicado, los cuales se muestran en la tabla 1.10.

Tabla 1.10. Parámetros ecológicos del proceso de corte, aire como gas plasma (17).

Prueba	Concentración [mg/m ³]					
	Polvo	O ₃	CO	NO ₂	Cr ₂ O ₃	Mn
1	61.2	0.28	36.0	5.4	2.4	0.42
2	60.5	0.34	38.8	5.8	2.6	0.40
3	61.7	0.30	42.8	5.6	2.2	0.44
4	60.8	0.34	39.8	5.6	2.4	0.40
5	61.2	0.32	38.8	5.8	2.6	0.42

O₃: Ozono; CO: Monóxido de carbono; NO₂: Dióxido de nitrógeno; Cr₂O₃: Oxido de cromo; Mn: Manganeseo.

1.4. SISTEMA MECÁNICO PARA SOPORTE Y AVANCE DE LA ANTORCHA DE PLASMA

El corte con plasma es un método desarrollado desde 1954 y que al pasar el tiempo se ha ido perfeccionando. En la actualidad ha pasado de ser un método manual a un semiautomático y posteriormente a un sistema completamente automático. Es decir, se puede controlar con comandos numéricos generados en un computador, que ordena al efecto físico del movimiento de la antorcha, realizando el corte de determinada pieza. Esta antorcha es soportada por partes

mecánicas o mecanismos desplazados con motores que proporcionan el avance y la velocidad adecuada dependiendo de pieza a cortar y su espesor. Dichos mecanismos deben trabajar de manera coordinada para dar los movimientos adecuados en los ejes X, Y, Z; los cuales transportan la antorcha encendida en un movimiento continuo, el que permite efectuar el corte de la pieza a ser procesada. En capítulos posteriores se analizará y diseñará los mecanismos para el movimiento y soporte de la antorcha de corte mediante arco de plasma.

1.5. SISTEMAS DE CONTROL

La misión del sistema de control de proceso será corregir las desviaciones surgidas en las variables de proceso respecto de unos valores predeterminados, que se consideran óptimos para conseguir las propiedades requeridas en el producto final.

1.5.1. Lazos de control del sistema CNC

El actuador de una máquina CNC es controlado continuamente para minimizar el error de posición y velocidad. El sistema de control de realimentación consta de tres lazos de control independientes para cada eje de movimiento de la máquina herramienta. El lazo más externo es el designado para el control de posición, en el medio se ubica el control de velocidad, mientras que el más interno controla la corriente. Los sitios donde se ubican los dispositivos de control también dependen del diseñador. El detector puede estar unido al eje del actuador o a una parte móvil del sistema. Los lazos de control pueden clasificarse en cuatro tipos, dependiendo de la ubicación en el sistema de control, los mismos que son descritos en la figura 1.21

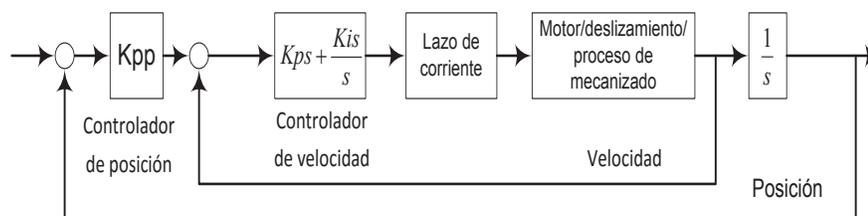


Figura 1.21. Tres tipos de lazos de control en un eje de movimiento del sistema CNC (18 pág. 17)

1.5.1.1. Lazo de control semi-cerrado

El dispositivo detector está unido al eje del actuador, el mismo que detecta el ángulo de rotación. La compensación por error de paso y de holgura se puede utilizar para aumentar la precisión de la posición. Esta compensación se realiza modificando las instrucciones para el controlador del actuador. El resultado de esta compensación es eliminar la acumulación de error de posición. La compensación de la holgura consiste en enviar pulsos adicionales que compensen tal holgura. En la figura 1.22 se muestra el esquema de este tipo de control.

1.5.1.2. Lazo de control cerrado

El desempeño del lazo semi-cerrado depende de la precisión de los elementos mecánicos, y es posible aumentar la precisión mediante la compensación. Sin embargo, la holgura puede variar de acuerdo al peso de la pieza y la localización. El control de lazo cerrado es afectado por la frecuencia de resonancia del desplazamiento de las partes móviles de la máquina, el sucesivo y repetitivo cambio de estado del movimiento relativo entre dos superficies en contacto de reposo (stick), a deslizamiento (slip); y puede tener influencia en las características del actuador, debido a que el cuerpo de máquina está incluido en el en el bucle de control de posición. Cuando se produce el error de seguimiento entre las posiciones: de mando y la detectada, el actuador gira a una velocidad proporcional a este error con el objetivo de disminuirlo. En lazo cerrado, si la frecuencia de resonancia del sistema de accionamiento de la máquina no es lo suficientemente mayor que la ganancia; el sistema se vuelve inestable. Para aumentar la frecuencia de resonancia del sistema de accionamiento, se puede aumentar la rigidez de la máquina, disminuir el coeficiente de fricción. En la figura 1.22 se muestra el esquema de este tipo de control.

1.5.1.3. Lazo de control híbrido

En este tipo de lazo, existen dos tipos de control: semi – cerrado, cuando se detecta la posición del eje de un motor; cerrado para escalas lineales. En la lazo semi – cerrado, se puede controlar la alta ganancia porque la máquina no está incluida dentro del sistema. En lazo cerrado se incrementa la precisión al

compensar el error que el lazo semi – cerrado no puede controlar, el lazo cerrado se utiliza para compensar sólo el error de posición a pesar de la baja ganancia. Al combinar el lazo cerrado y el semi – cerrado, es posible lograr una alta precisión.

1.5.1.4. Lazo de control abierto

Este tipo de control se puede aplicar en el caso que la precisión de control no es alta y se utiliza un motor paso a paso. La precisión del sistema de conducción está directamente relacionada con la precisión del motor de pasos y el sistema de transmisión de movimiento. En la figura 1.22 se muestra el esquema de este tipo de control.

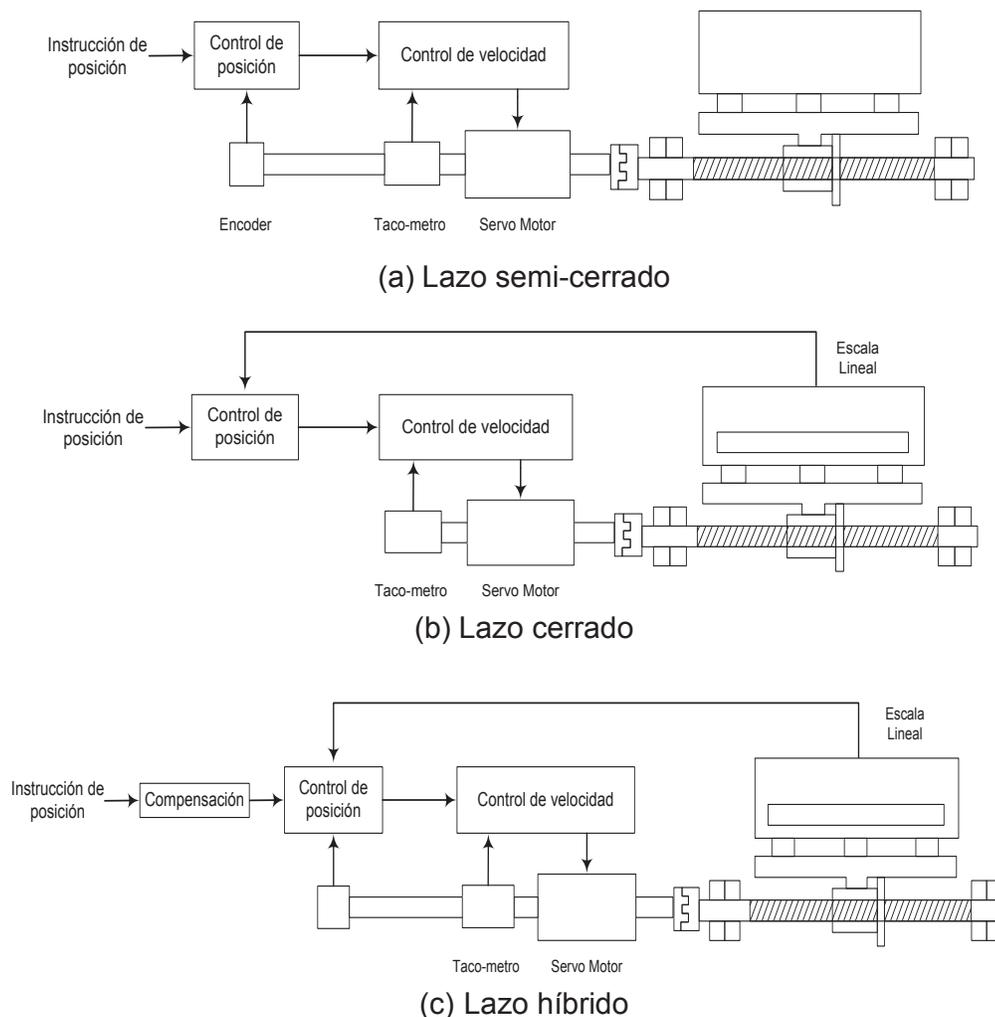


Figura 1.22. Clasificación de lazos de control en el sistema CNC (18 pág. 20).

1.5.2. Componentes del sistema de mando

Este sistema consta de motor o actuador, sensores y los mecanismos de transmisión de potencia. Los comandos NC, hacen que el motor gire y por el movimiento circular transmitido a los mecanismos de potencia se producen movimientos lineales en cada uno de sus ejes, el movimiento coordinado de cada uno de estos ejes trazan un determinado perfil bidimensional o tridimensional; de acuerdo a los códigos NC y al número de ejes de la máquina herramienta. Los movimientos son controlados por señales generadas en los sensores; el caso de control de servo motores, los que miden su movimiento son los encoders.

1.5.2.1. Servomotor

El término motor de accionamiento se utiliza para llamar al servomotor, el cual mueve los mecanismos, así como la antorcha de la de la mesa de corte. Los servomotores poseen como características alto torque, alta aceleración, y una respuesta rápida a baja velocidad y simultáneamente puede controlar la velocidad y la posición. Los tipos de servo motores que existen se describen en el anexo 2, las características requeridas de los servomotores para máquinas herramientas son las siguientes:

- Adecuada salida de potencia conforme la carga de trabajo
- Respuesta rápida de una instrucción
- Buenas propiedades de aceleración y desaceleración.
- Para obtener un amplio rango de velocidad
- Para obtener continua operación durante tiempos largos
- Para generar un par adecuado torque de acuerdo a la pieza a mecanizar
- Fácil mantenimiento.
- Para generar un adecuado torque al momento de parar. En la figura 1.23 se muestran los diferentes tipos de servo motor.

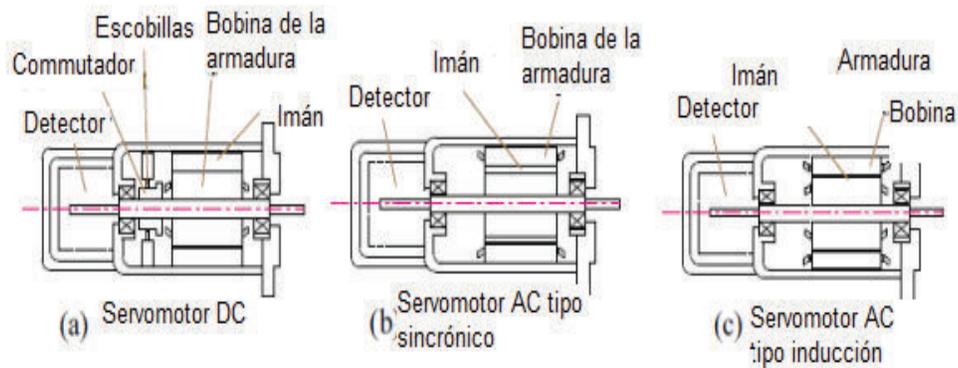


Figura 1.23. Tipos de servo motor (18 pág. 10).

A continuación se describen las principales características de un servo motor para una máquina herramienta:

- Capaz de conseguir una adecuada salida de energía en función de la carga de trabajo
- Capaz de responder rápidamente a una instrucción
- Tener buenas propiedades de aceleración y desaceleración
- Tener un amplio rango de velocidad
- Capaz de controlar la velocidad con seguridad en todos los rangos
- Capaz de operar continuamente en largos periodos de tiempo
- Capaz de proporcionar una aceleración y desaceleración continuamente
- Tener una alta resolución con el objetivo de generar un torque adecuado en el caso de bloques pequeños
- Ser fáciles de girar y tener una alta presión de rotación
- Generar un torque adecuado para detenerse
- Ser fácil de mantener

Para cubrir las características antes indicadas, en la tabla 1.11 se muestran las principales características de los tipos de servo motor antes mencionados:

Tabla 1.11. Resumen de características de los tipos de servo motor (18 pág. 12).

	Servo motor DC	Servo motor AC sincrónico	Servo motor AC de inducción
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo precio • Amplio rango de velocidad • Fácil de controlar 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin escobillas • Fácil de parar 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura simple • No necesita detector de posición
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste de las escobillas por calor • Ruido • Necesita un detector de posición 	<ul style="list-style-type: none"> • Compleja estructura • Vibración • Necesita un detector de posición • Torque ondulado 	Frenado dinámico imposible
Capacidad de espacio	Pequeño	Pequeño o mediano	Mediano o grandes
Sensor	No necesario	Codificador, dispositivo de resolución	No necesario
Duración de vida	Depende de la vida útil de la escobilla	Depende de la vida útil de los rodamientos	Depende de la vida útil de los rodamientos
Alta velocidad	Inadecuada	Aplicable	Optimizado
Resistencia	Pobre	Buena	Buena
Imán permanente	Existe	Existe	Ninguno

1.5.2.2. Encoders

Este dispositivo es un transductor rotativo que convierte el movimiento angular en señales eléctricas con forma de onda cuadrada. Los encoders pueden ser empleados para manejar movimientos angulares o lineales y se encuentran integrados en el extremo del eje de transmisión de potencia.

El método que es usado por el codificador para detectar la velocidad es contar los pulsos generados en una unidad de tiempo y un dispositivo para detectar los intervalos entre pulsos. Los codificadores pueden ser clasificados en dos tipos: ópticos y magnéticos, el método de detección de pulsos es diferente, pero generan la señal de la misma manera. Con respecto a su función, el codificador los encoders ópticos pueden ser de dos tipos: incremental y absoluto, en el anexo 3 se indica una descripción más detallada de este tipo de encoders. En la figura 1.24 se muestra el encoder incremental.

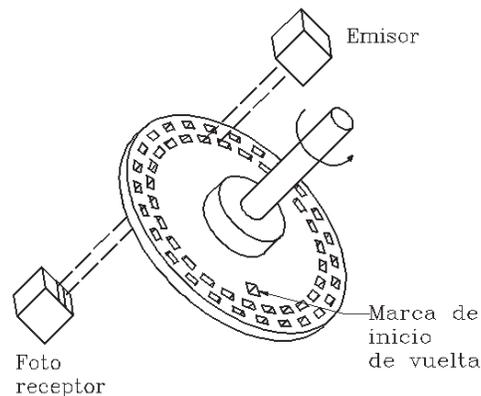


Figura 1.24. Codificador óptico incremental (19 pág. 168).

La configuración de ranuras es en círculos concéntricos hacia el interior del disco como se ve en la figura 1.25. Por consiguiente los encoders absolutos no pierden la posición real cuando se corta la alimentación (incluso en caso de desplazamientos), hasta un nuevo encendido (gracias a una codificación directa en el disco), la posición está actualizada y disponible sin tener que efectuar, como en el caso de los encoder incrementales la búsqueda del punto de cero, de la misma manera requiere varios sensores ópticos a diferencia del encoder incremental.

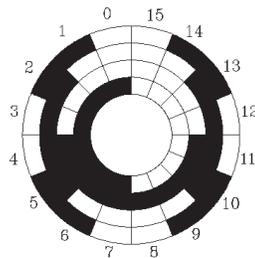


Figura 1.25. Codificador absoluto, esquema de un rotor simplificado de 4 sectores (16 posiciones) (20 pág. 123).

1.5.2.3. Motores de paso

El motor de pasos tiene la capacidad de transformar los cambios de excitación conmutados en incrementos o pasos definidos por la posición del rotor. Estos motores poseen dientes salientes de material magnético permeable tanto en la parte giratoria o rotor y en la parte estática o estator. Existe un espacio pequeño entre el rotor y el estator, por donde el magnetismo fluye. Dependiendo del tipo de

motor, la fuente de flujo puede ser un imán permanente o un devanado de conducción de corriente o su vez una combinación de los dos tipos. Debido a la fuente de flujo magnético y a la naturaleza de funcionamiento se dividen en motores de paso híbridos, de reluctancia variable e imán permanente. En la tabla 1.12 se indica el resumen de características de los dos tipos de motores a paso.

Tabla 1.12. Características de los tipos de motores de paso.

Característica	Motor de pasos híbrido	Motor de pasos de reluctancia variable	Motor de pasos de imán permanente
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeña longitud de paso, típicamente 1.8° • Capacidad de par mayor en comparación al motor de reluctancia variable • Par de retención alto en posición estática • Trabaja en lazo abierto • Funciona en frecuencias más altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de paso 15° • Inercia mecánica del rotor más baja en comparación a los motores híbridos • Trabaja en lazo abierto 	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de paso 7.5° • Inercia mecánica del rotor más alta en comparación a los motores de reluctancia variable • Trabaja en lazo abierto • Existe par de retención
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> • Dependen de la precisión de los elementos mecánicos de movimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de par menor en comparación al motor híbrido • Dependen de la precisión de los elementos mecánicos de movimiento • Dificultad de operación a altas frecuencias • No existe par de retención 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de par mayor en comparación al motor de reluctancia variable • Dependen de la precisión de los elementos mecánicos de movimiento • Dificultad de operación a altas frecuencias
Capacidad de espacio	Pequeño	Mediano	Mediano y grande
Alta velocidad	Adecuada	Aplicable	Aplicable
Costo	Caros en comparación a los de reluctancia variable	Bajo costo en comparación a los híbridos	Bajo costo en comparación a los híbridos
Imán permanente	Existe	No existe	Existe

1.5.2.4. Parámetros de selección de actuadores o motores

El motor representa el costo más influyente en el sistema de control de movimiento y por lo tanto también afecta durante el funcionamiento, debido al consumo de energía. Los parámetros a tener en consideración para la selección de estos motores son los siguientes:

- Selección de mecanismos de movimiento. Determinación de patrones de funcionamiento, ver figura 1.26.
- Determinación de aceleraciones y tiempos de funcionamiento de acuerdo a los patrones de funcionamiento.

- Cálculo de inercias de los mecanismos y sistemas de soporte de acuerdo al eje de movimiento.
- Cálculo de torque pico o máximo, de este depende la ruptura de la inercia en estado estático de los mecanismos y soportes de los mismos, es decir cuando el sistema empieza a acelerar o desacelerar.
- Cálculo de torque constante, es el que mantiene al mecanismo en movimiento constante, es decir cuando no existe aceleración o desaceleración.
- El torque constante depende de fuerzas no inerciales tales como la fricción, gravedad, fuerzas de precarga entre otros.

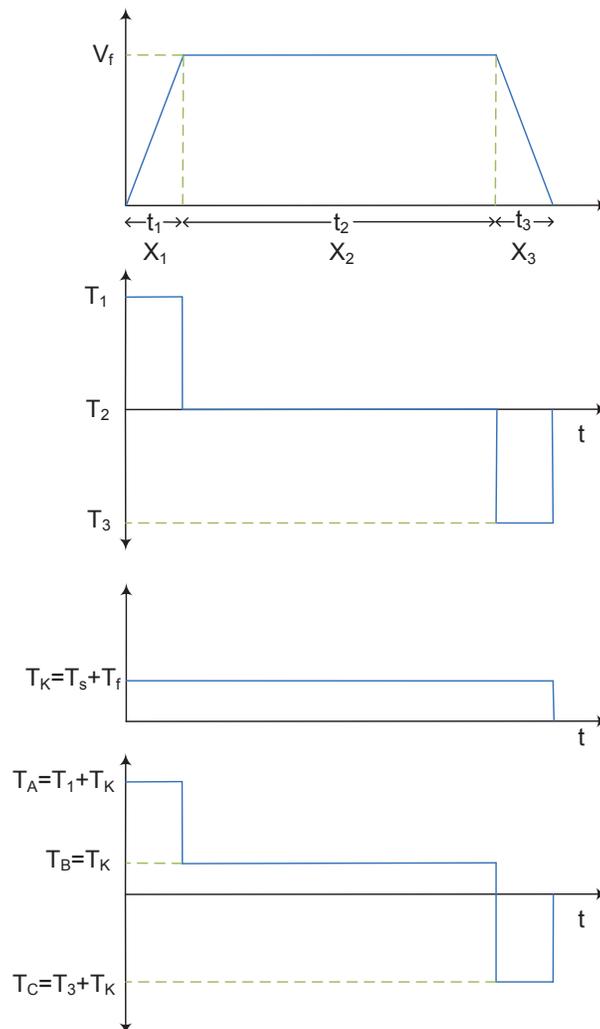


Figura 1.26. Ciclo de funcionamiento o trabajo para un motor en sistema de pasos o servo motor.

1.5.2.5. Mecanismos de transformación de movimiento

Los mecanismos de transmisión de potencia que transforman el movimiento circular a lineal pueden ser a través de tornillo sinfin/tuerca o cremallera/rueda. Estos dispositivos se muestran en las figuras 1.27 y 1.28. En la tabla 1.13 se indican las principales ventajas y desventajas de los tipos de mecanismos.

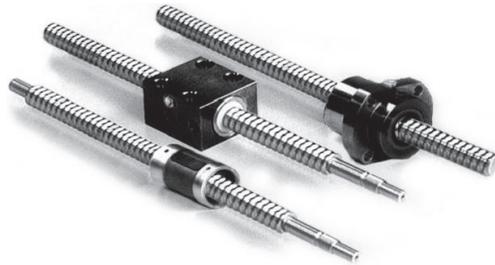


Figura 1.27. Mecanismo tornillo de bolas/ tuerca (21 pág. 4/28).



Figura 1.28. Mecanismo cremallera-rueda (22).

Los mecanismos de transformación de movimiento lineal que utilizan tornillos son de dos tipos: tornillos de potencia y tornillos de bolas. Los tornillos para transmitir potencia utilizan rosca cuadrada, ACME y trapecial, de las cuales la cuadrada y la trapecial son las más eficientes. La particularidad que tiene la rosca trapecial es que se utiliza solo cuando se transmite potencia en una dirección. En la tabla 1.13 se muestra las diferencias, ventajas, desventajas y otros parámetros de estos tipos de transmisión de potencia.

Tabla 1.13. Principales características de mecanismos de transformación de movimiento giratorio a lineal.

Tipo	Transmisión de movimiento	Tipo de contacto	Ventajas	Desventajas	Parámetros a controlar en el diseño
Tornillo - Tuerca	Rosca cuadrada	Deslizante	Transmite altas potencias, capacidad de auto bloqueo para aplicaciones verticales, funcionamiento relativamente silencioso	Desgaste proporcional al uso, se requieren motores de alta capacidad, eficiencia relativamente baja	Vibración y pandeo
Tornillo - Tuerca	Rosca acme	Deslizante	Transmite altas potencias, capacidad de auto bloqueo en aplicaciones verticales, funcionamiento relativamente silencioso, aplicable a equipos con velocidades de trabajo bajas	Desgaste proporcional al uso, se requieren motores de alta capacidad, eficiencia relativamente baja	Vibración y pandeo
Tornillo - Tuerca	Rosca trapecial	Deslizante	Fácil de maquinar, transmite altas potencias, funcionamiento relativamente silencioso, capacidad de auto bloqueo en aplicaciones verticales	Desgaste proporcional al uso, se requieren motores de alta capacidad, eficiencia relativamente baja, solo transmite fuerzas en una sola dirección	Vibración y pandeo
Tornillo - Tuerca de bolas	Rosca circular	Rodante	La fricción es mínima, por lo tanto presenta una mayor eficiencia entre el 90% al 95%, desgaste bajo ideal para aplicaciones que requieren ciclos de alta fatiga, empuje y altas velocidades	Mayor costo que un tornillo acme	Vibración y pandeo
Cremallera - rueda	Dientes	Rodante	Fácil de maquinar, se puede trabajar en posiciones verticales e inclinadas, menor costo que el tornillo de rosca acme y el tornillo de bolas, permite el movimiento en longitudes relativamente grandes, la eficiencia es comparable con los tornillos de bola	La cremallera necesita un riel de soporte en toda su longitud	La vibración y el pandeo depende del soporte donde se monta

1.5.2.6. Guía de movimiento lineal

El movimiento lineal es realizado por mecanismos tornillos sinfin/cojinete de bolas o por cremallera/rueda dentada, los mismos que transforman el movimiento circular de los motores a movimiento lineal. Paralelo a estos mecanismos se montan guías que aseguran la precisión y la suavidad del movimiento. Las guías lineales consisten en un riel tipo M o cuadradas o rieles redondos, sobre estos rieles se mueven patines o seguidores, como se ve en las figuras 1.29 y 1.30. Entre las superficies de movimiento relativo existe lubricante para reducir la fricción

mientras el movimiento se transfiere. Las ventajas y desventajas de estos dos tipos de guías se muestran en la tabla 1.14. Las principales características de seguidores o patines, que pueden ser deslizantes o rodantes, se indican en la tabla 1.15.



Figura 1.29. Guías tipo M para movimiento lineal (23).



Figura 1.30. Guías redondas para movimiento lineal (24).

Tabla 1.14. Ventajas y desventajas de guías cuadradas y redondas.

Tipo de guía	Ventajas	Desventajas
Redonda	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de funcionar en superficies con error de planicidad • Complejidad baja en caso de construir 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos bajos en comparación a las guías cuadradas • Alineación compleja
Cuadrada	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez y presión alta • Capacidad de soportar momentos en todas direcciones • Patines más compactos que los de guía redonda • Alineación menos compleja 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados • Complejidad alta en caso de construir • Elevados costos de mantenimiento • Superficie de montaje con error de planicidad extremadamente bajos

Tabla 1.15. Comparación de características entre patines deslizantes y rodantes (25).

Función	Patín Rodante	Patín deslizante
Fricción	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de fricción: 0.01 o menor • La diferencia entre fricción estática y dinámica es pequeña • Al cambio de velocidad es ligera 	<ul style="list-style-type: none"> • La fricción es alta • La fricción estática y dinámica varía grandemente
Presión de posicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Leve pérdida de movimiento • Las oscilaciones son leves • Fácil micro posicionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta pérdida de movimiento • Las oscilaciones son altas • Dificultad para el micro posicionamiento
Vida	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de estimar 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de estimar
Rigidez estática	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente alta • No existe juego a causa de la precarga • Fácil de estimar la rigidez 	<ul style="list-style-type: none"> • La rigidez es grande contra la carga de una sola dirección • Existe juego mecánico • Difícil de estimar la rigidez
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia gama de uso de baja a alta velocidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Inadecuado para velocidades extremadamente bajas y altas
Mantenimiento y confiabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Larga vida mediante un simple mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Se pierde precisión por la deteriorada superficie de la guía

Otro sistema de guiado consiste en la levitación magnética (maglev), se compone principalmente de electroimanes, guía de alimentación, rodamientos, sistema de motor lineal y sistema de control. El sistema se muestra en la figura 1.31; el espacio de aire entre la guía de alimentación y guía es enviado al controlador, que detectada el desplazamiento mediante un sensor, que controla la señal de corriente y voltaje desde el controlador. La señal es amplificada y enviada a la bobina de un electroimán, el campo magnético producido hace que se mantenga en equilibrio. En la guía de levitación magnética el movimiento controlado con precisión sin fricción a lo largo del carril de guía lineal (26), el sistema es muy sofisticado por lo tanto caro.

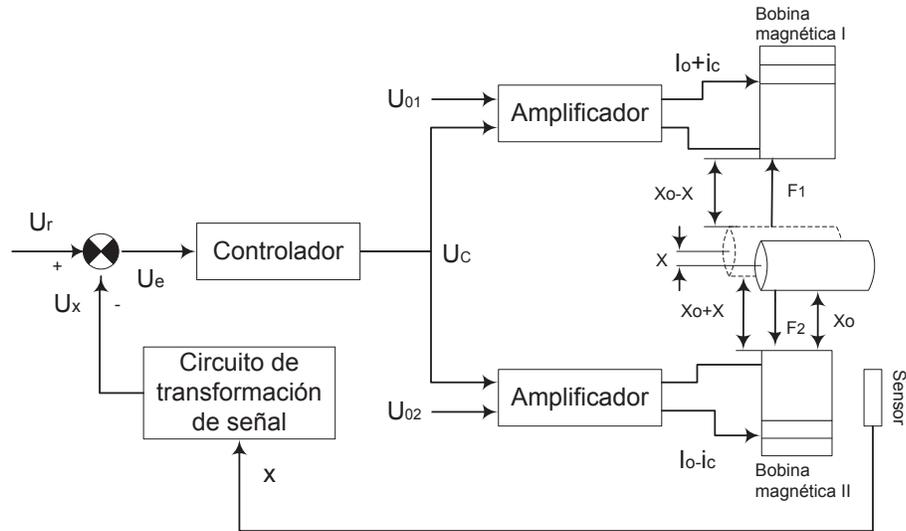


Figura 1.31. Estructura del sistema de levitación magnética (26).

1.5.2.7. Acoples

Los acoples flexibles son usados para conectar el eje del motor a la parte móvil de la máquina. Lo ideal es que el eje del motor y el eje de la parte móvil sean concéntricos pero en la realidad esto no se consigue. Por esta razón es necesario el uso de acoples flexibles que permitan en movimiento con rotación desalineada. Para la unión del motor y el cuerpo del husillo también se utilizan correas y ruedas dentadas como elementos mecánicos de acople. Cuando el motor y el husillo están separados se usa una correa o banda para la transmisión de potencia. Otra manera es utilizar ruedas dentadas, más conocido como método de accionamiento indirecto. El uso de este método no es adecuado para el mecanizado de alta velocidad, genera ruido y desgaste de los elementos. Para evitar estos problemas se utiliza un accionamiento directo que consiste en conectar directamente el eje del motor al eje del husillo. Con esto se obtiene una reducción de la variación del par de movimiento. La desventaja es que tiene un alto costo, un ejemplo de estos acoples se muestran en la figura 1.32.

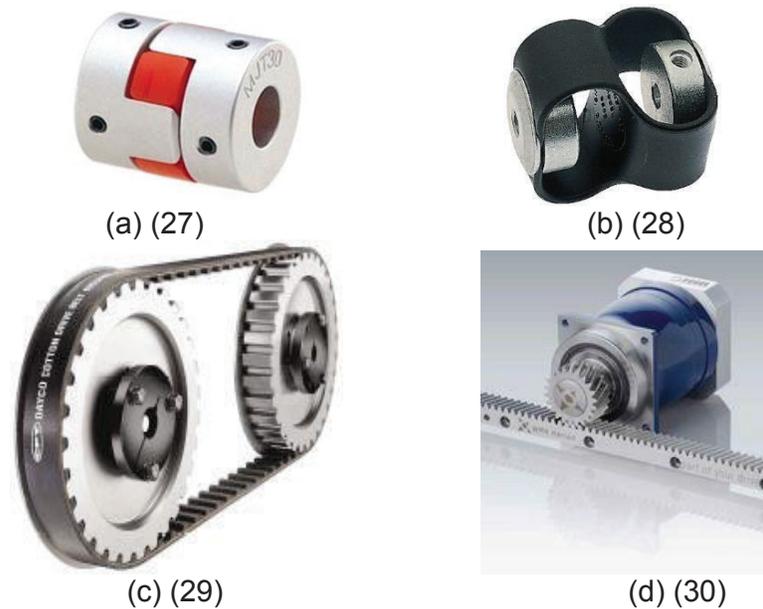


Figura 1.32. Acoples y transmisores de potencia (a) acople para ejes, (b) acople elástico, (c) transmisión de potencia con bandas, (d) transmisión de potencia con rueda dentada

1.5.2.8. Finales de carrera

Se usan como contactos normalmente abiertos o cerrados, los mismos que envían una señal a la tarjeta principal para que detengan el programa cuando se cierran o se abren, una vez que las plataformas salen de los límites de trabajo.

1.5.2.9. Sensores ópticos

Basan su funcionamiento en la emisión de un haz de luz que es interrumpido o reflejado por el objeto a detectar. Los sensores ópticos se componen de dos elementos principales, un sensor y un emisor de luz, pudiendo estar este último integrado dentro del sensor o estar situado fuera. Estos sensores permiten que la punta de la antorcha se ubique en el punto de coordenadas 0, 0, de donde iniciará su trabajo. De estos sensores se utilizan los contactos normalmente abiertos los cuales envían la señal a la tarjeta principal. Una vez que el sensor detecta la posición de la plataforma en la coordenada 0,0 de los carros X, Y, se detiene el movimiento de los motores y permite programa encerrar la posición de la herramienta en el punto de referencia o home de la máquina.

1.5.3. Componentes del sistema CNC

Desde un punto de vista funcional el sistema se puede dividir en las siguientes etapas: la interfaz hombre – máquina (MMI), el núcleo del control numérico (NCK), y la unidad lógica programable (PLC). En la figura 1.33 se presenta un detalle general de los componentes del sistema CNC; mientras que en la figura 1.34 se muestra un esquema detallado de un sistema CNC.

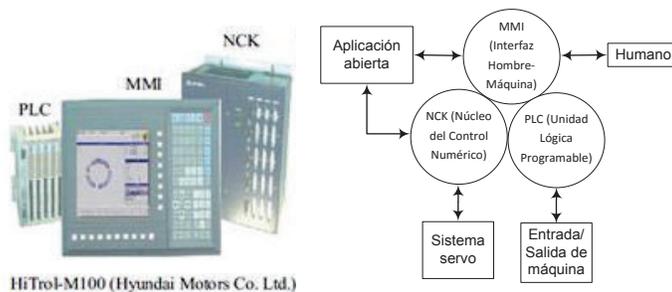
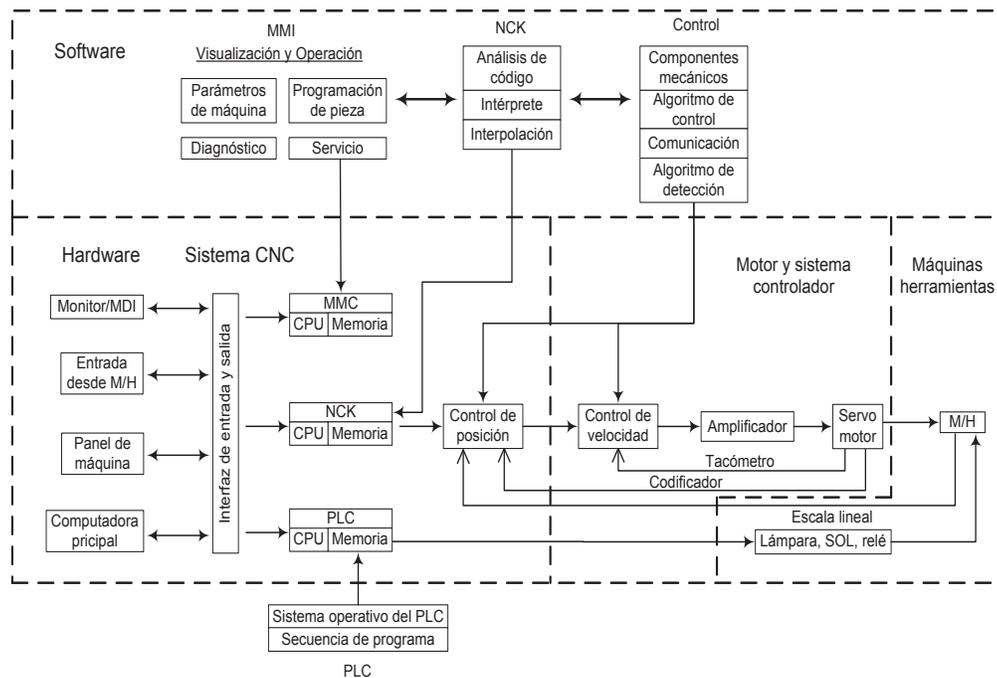


Figura 1.33. Detalle general de componentes del sistema CNC (18 pág. 20).



MMI: Interfaz hombre-máquina; MDI: Interfaz de múltiples documentos; NCK: Núcleo de control numérico; PLC: Control lógico programable; CPU: Unidad central de proceso.

Figura 1.34. Componentes de un sistema CNC (18 pág. 21).

Desde el punto de vista de componentes, consiste en el sistema de accionamiento del motor y máquina herramienta. El control de posición es el objetivo primordial del sistema CNC. La señal de salida es enviada al sistema de accionamiento del motor, que controla la velocidad y el torque de un motor, este a su vez acciona los mecanismos de transmisión de potencia. Las unidades MMI, NCK y PLC conforman el procesador principal del sistema CNC. La memoria solo de lectura (ROM), almacena los comandos de procesamiento de la pieza; mientras que la memoria de acceso aleatorio (RAM), almacena los programas de PLC. El módulo de proceso está conectado a una interfaz que consiste en una llave o clave de acceso, un controlador visual, una entrada externa, y un sistema de conducción de datos.

Inicialmente la transmisión de señales al sistema de accionamiento del motor era analógica. Con el fin de reducir el ruido, se opta por hacer la transmisión de datos señales digitales. Tales señales son obtenidas aplicando dispositivos de entrada y salida, por medio de sensores y actuadores mecánicos. Las señales generadas son transmitidas por medio de una línea de comunicación única, para lo cual se ha establecido protocolos estandarizados de comunicación como: Profi-bus, CAN bus, e Inter – bus – S.

1.5.4. Funciones MMI

La unidad MMI ofrece la interfaz con el usuario. Estas funciones pueden clasificadas en cinco grupos:

1.5.4.1. Funciones operacionales

Estas funciones son usadas para dar soporte a la operación de la máquina y se muestra el estado de la máquina en una pantalla. Los datos posición, trayectoria, alimentación de cada eje, velocidad del husillo, y bloque que se está ejecutando son observados en una pantalla. Adicionalmente son proporcionados funciones de ayuda de operación, búsquedas, edición de programas y gestor de herramientas.

1.5.4.2. Funciones de ajuste de parámetros

Estas funciones proporcionan la interfaz para establecer, almacenar y buscar los parámetros. Estos parámetros son categorizados en tres tipos:

- Parámetros de regulación de la máquina, sistema de conducción del servomotor y el husillo, compensaciones para la herramienta, coordinación del trabajo, y fronteras de seguridad
- Parámetros de programa, que son establecidos durante la edición del programa de la pieza
- Parámetros de personalización, que son utilizados para adaptar la máquina a las necesidades del usuario

1.5.4.3. Funciones de edición de programa

Estas funciones tienen la capacidad de editar y modificar el programa de la pieza según estándares ISO/EIA, para lo que es necesario que el usuario conozca la codificación y cálculos matemáticos utilizados. Debido a que los cálculos matemáticos son complejos se ha optado por el uso de programas de generación de códigos a partir de un modelo establecido en archivos bidimensionales o tridimensionales.

1.5.4.4. Funciones de vigilancia y alarma

Estas funciones informan al usuario sobre el estado de la máquina herramienta. Son esenciales para máquinas herramientas que trabajan con altas velocidades. Estas funciones informan acerca del estado de la alarma, el método de recuperación de emergencia, estado del controlador, y los bloques de programación que se está ejecutando en tiempo real.

1.5.4.5. Funciones de servicio/utilidad

La función DNC (control numérico directo), sirve para la transferencia de datos entre el computador y el control CNC, también la función de copiar archivos internos, y la comunicación a otros equipos.

1.5.5. Funciones NCK

El sistema de control numérico, interpreta los datos de entrada, los almacena, envía los comandos al sistema de control y detecta señales de retroalimentación. También realiza decisiones lógicas como liberación del refrigerante, encendido del husillo, cálculos para el control de la aceleración, interpolación de líneas, círculos y parábolas. Por lo tanto, la unidad NCK se encarga del servomotor y el controlador, mientras que la unidad PLC tiene la función de lógica de control, por lo que la carga que se produce en el control es adecuadamente equilibrado. La unidad NCK es la fundamental en el sistema CNC, cuyas funciones principales son: intérprete, interpolador, control de aceleración/desaceleración, y controlador de posición; la descripción de estos elementos se puede ver en el anexo 4.

1.5.6. Funciones PLC

El controlador lógico programable es utilizado para ejecutar controles secuenciales, consiste en dispositivos eléctricos, incluyendo microprocesadores y memoria; capaces de realizar operaciones lógicas, funciones de contador y temporizador, funciones aritméticas. Los módulos incluidos dentro del PLC se muestran en la figura 1.35. El módulo de programación consta del editor, compilador y monitor, que son usados para crear la aplicación del programa por parte del usuario. El compilador convierte la programación a un lenguaje que es interpretado por el PLC, el programa compilado es más eficiente y por lo tanto la ejecución del programa es más rápida. El programa compilado se transmite al módulo CPU, es donde se lee y ejecuta secuencialmente las operaciones lógicas. La acción que se está ejecutando en el módulo CPU, es enviada al monitor de la unidad PLC para su monitoreo. El ejecutor repite sucesivamente, la lectura de los puntos en los módulos de entrada, haciendo operaciones lógicas del programa, y el envío de los resultados a los puntos de salida a través del módulo de salida.

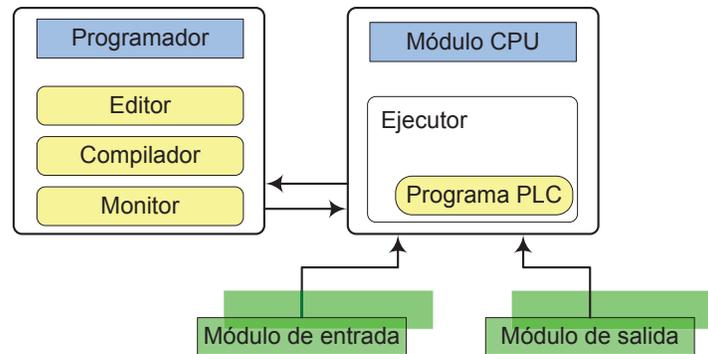


Figura 1.35. Configuración y funciones del sistema PLC (18 pág. 27).

Las ventajas del PLC son las siguientes:

- Flexibilidad: La lógica de control puede ser cambiada según la necesidad por programaciones específicas
- Escalabilidad: Se puede expandir el sistema añadiendo módulos y cambiando programas
- Eficiencia económica: Facilidad de mantenimiento y alta fiabilidad
- Miniaturización: Se necesita menos espacio en comparación a una caja de control de relés.
- Fiabilidad: La probabilidad de que ocurran fallas debido a un mal contacto disminuye debido al uso de semiconductores
- Rendimiento: Funciones avanzadas tales como las operaciones aritméticas y edición de datos son posibles.

El PLC de un sistema CNC es similar a un PLC general, la diferencia es que este necesita de un control auxiliar para las funciones de la unidad NCK, por lo que son necesarias las siguientes funciones:

- Circuito para las comunicaciones con la unidad NCK
- Doble puerto de memorias RAM para la comunicación de alta velocidad
- Memoria de datos intercambiados durante la comunicación de alta velocidad con la unidad NCK
- Módulo de entrada de alta velocidad para el control de altas velocidades

La programación se basa en distintos lenguajes, debido a esto se dificulta el aprendizaje de usuarios y mantenimiento del equipo. Para evitar estos conflictos

se ha creado el lenguaje estándar de PLC, bajo la norma IEC 1131-3, la misma que define cinco tipos de lenguaje que deber ser conocidos por él usuario, para la interpretación y ejecución de un programa PLC:

- a) Texto estructurado (ST)
- b) Diagrama de funciones de bloque (FBD)
- c) Diagrama de funciones secuenciales (SFC)
- d) Diagrama de contactos (LD)
- e) Lista de instrucciones (IL 1)

1.5.7. Sistema de control de tiempo real

En un sistema NC, las unidades MMI, NCK, PLC deben ejecutarse en intervalos constantes de tiempo, debido a esto es un complejo sistema en tiempo real. La función de programación de tareas que desempeñan estas unidades, se gestiona con la ejecución de los módulos en intervalos de tiempo predefinidos y prioridades. En la figura 1.36 se muestra los intervalos de tiempo para tareas en un sistema de control numérico. La prioridad de tareas se ubica en el eje Y, donde la que tiene alta prioridad es la posición mientras que la de baja prioridad es las funciones de la unidad MMI.

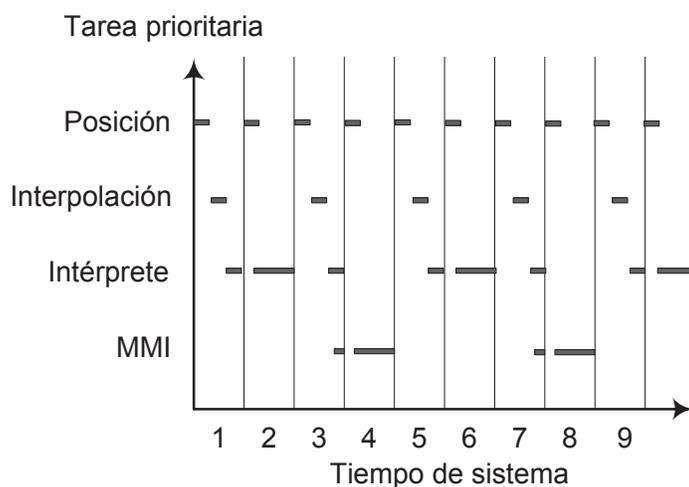


Figura 1.36. Programación de tareas en un sistema NC (18 pág. 28).

En conclusión, para el diseño del sistema NC, es necesaria la modulación de tareas y asignación de prioridades para cada tarea, la selección del método de

programación y el mecanismo de sincronización, y la comunicación entre las tareas, que son parte del diseño del sistema.

1.6. SISTEMAS CAD-CAM

El sistema CAD-CAM es solo una etapa del proceso, integrando a las otras etapas se puede logra un sistema CNC que es capaz de leer interpretar y ejecutar las líneas de comando para la producción de una determinada pieza. Los códigos de programación constan de bloques que ordenan el efecto físico de la herramienta, tales códigos se muestran en la tabla 1.16.

Tabla 1.16. Códigos de direcciones para control numérico

Comando	Descripción
N	Número de secuencia o bloque
G	Funciones de movimiento
X	Comando para el eje X
Y	Comando para el eje Y
Z	Comando para el eje Z
R	Radio desde el centro previamente definido
I	Desplazamiento del centro del arco del eje X
J	Desplazamiento del centro del arco del eje Y
K	Desplazamiento del centro del arco del eje Z
F	Velocidad de corte
S	Velocidad de giro del husillo
T	Numero de herramienta
M	Funciones preparatorias
A	Dimensiones angulares respecto al eje X
B	Dimensiones angulares respecto al eje Y
C	Dimensiones angulares respecto al eje Z
U	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje X
V	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje Y
W	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje Z
D	Diámetro de la herramienta de corte

El CAD es utilizado para definir características dimensionales, contorno y forma de algún producto determinado que pueden ser modificados según la necesidad. Estos archivos digitales pueden contener determinada geometría: bidimensional o tridimensional. Otra ventaja que presentan los sistemas CAD es que se puede simular su funcionamiento antes de su producción y asegurar que el producto operara de acuerdo al uso que se destinará. Por otra parte el sistema CAM (Computer Aided Manufacturing) elimina los errores de fabricación, se obtiene una

mejor precisión dimensional, incremento de la producción, disminución de desperdicios de material, desgaste moderado de las herramientas.

La combinación de estos dos sistemas conforma un sistema integrado o más conocido como CAD-CAM. Por medio del CAD se modela determinadas piezas, integrado a sistema CAM se puede obtener los códigos de control numérico de la pieza representada en el sistema CAD. Para obtener una codificación que sea interpretada sin problemas para los distintos controladores se ha establecido estándares que normalizan estos códigos son: ISO 6983 (International Standardization Organization) y EIA RS274 (Electronic Industries Association). El flujo de tareas que son necesarias para producir una pieza, utilizando una máquina NC, se muestra en la figura 1.37. Las tareas que se muestran en la figura 1.36, se describen a continuación.

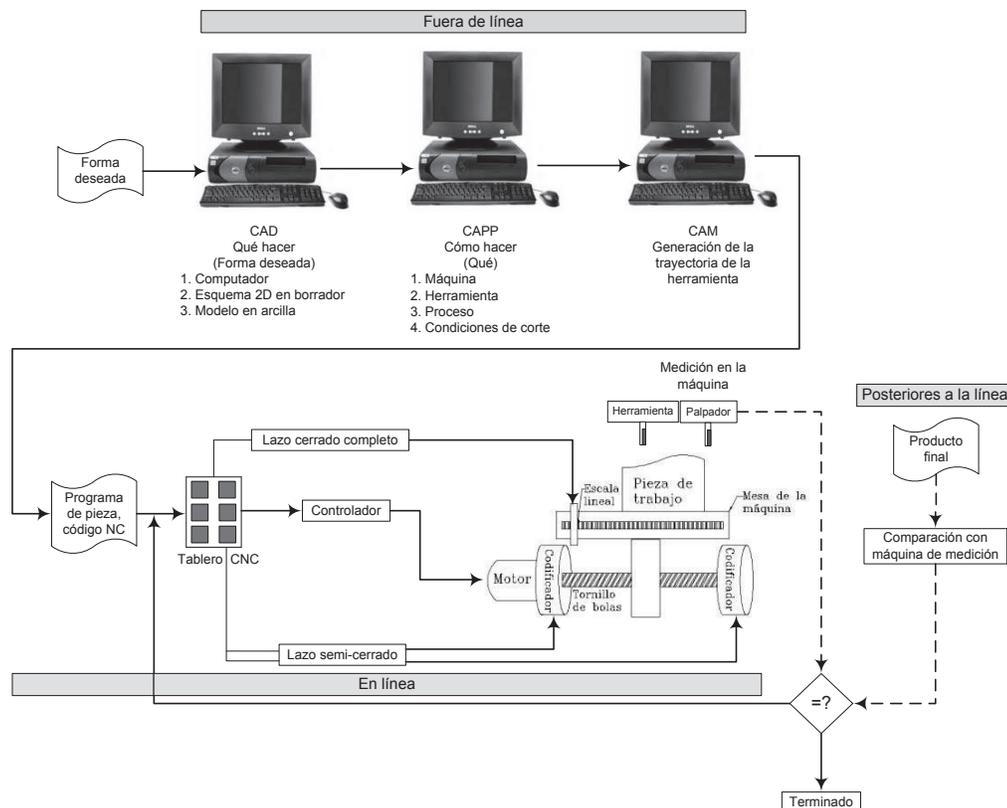


Figura 1.37. Configuración de las máquinas herramientas NC y el flujo de operación de mecanizado (18 pág. 7).

1.6.1. Tareas fuera de línea: CAD, CAPP, CAM

Las tareas fuera de línea son necesarias para generar el programa de una pieza que controla la máquina NC, luego de que la geometría se ha establecido en programas CAD; ya sean archivos 2D o 3D; se procede con el diseño y análisis, que son incluidos en una misma etapa. El proceso de planificación asistido por computadora (CAPP) se realiza una vez que los trabajos de diseño y análisis hayan concluido. Con estos datos se selecciona la máquina herramienta, plantillas, accesorios y herramientas, decisiones de las condiciones de cortado, programación y secuencias de maquinado. Este proceso depende en gran manera de la experiencia del planificador del proceso. Posteriormente se ejecuta el paso final que es la generación del programa de la pieza. En esta etapa se crean las trayectorias de la herramienta en base a la información CAD y la etapa de planeación CAPP. Además se efectúan la detección de posibles colisiones entre la herramienta y la pieza de trabajo, minimización de tiempos de maquinado y cambios e herramienta. En general, el CAM es importante para la generación de trayectorias en piezas 2D o 3D para máquinas herramientas con más de tres ejes.

1.6.2. Tareas en línea: Mecanizado NC, monitoreo y medición en la máquina

Las tareas en línea, constituyen la etapa donde el sistema NC lee e interpreta el programa de la pieza desde la memoria y ejecuta el movimiento en los ejes de la máquina con las velocidades especificadas y en la posición indicada en el programa de la pieza. Tales movimientos son realizados por motores con lo que se produce el trabajo sobre la pieza. La precisión de los mecanismos debe ser alta y no sensible a la vibración y la temperatura. Durante el proceso se monitorea las alteraciones que se puedan dar son controladas por el sistema.

1.6.3. Tareas posteriores: Inspección luego de la operación

En la etapa de tareas posteriores se compara entre el resultado y la geometría del modelo. Las piezas producidas tendrán una gran variación de dimensiones si no se consideró la compensación por el ancho de la herramienta, o si se necesitan un proceso posterior de acabado. Esta comparación puede ser realizada por computador (CAI: Computer Aided Inspection) con los datos de la pieza producida y el modelo geométrico.

1.7. IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES

El Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional ha identificado la necesidad de contar con un equipo de corte automático de planchas. Por esta razón es necesario satisfacer la siguiente necesidad:

Diseñar un equipo de corte automatizado mediante plasma, capaz de trabajar con láminas de 2440 mm de largo, 1220 mm de ancho y 35 mm de espesor. Los cortes a realizarse con este equipo serán rectos y curvos, definidos mediante líneas rectas, arcos de circunferencia y curvas en general. El posicionamiento, desplazamiento y velocidad de avance de la antorcha de plasma así como también la geometría de corte deben ser definidos mediante una interfaz de usuario y un software asistido por computador. Los cortes deben ser realizados con la mayor rapidez y precisión posible, garantizando la seguridad del operador del equipo y la minimización de los riesgos mediante la identificación de los mismos.

1.8. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo general de este trabajo es:

Diseñar y construir un equipo para corte de planchas con plasma operado por computador.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Diseñar una mesa de corte para soportar una plancha de tamaño estándar.
- Seleccionar un programa para la generación de datos geométricos de elementos a cortar
- Diseñar una interfaz que permita tomar los datos de geometría y enviarlos a un sistema que controle el desplazamiento automático de una antorcha de plasma
- Diseñar un sistema automático para el control de los mecanismos de la máquina

Durante la ejecución del proyecto se efectuarán las siguientes actividades:

- a) Se diseñará una mesa para soportar una plancha de tamaño estándar, de 1.22 x 2.44 m, con sus respectivos mecanismos.
- b) Se diseñará el sistema automático para el corte de planchas con la antorcha de plasma
- c) Se diseñará el sistema mecánico para el funcionamiento de la mesa de corte.
- d) Se construirá el sistema mecánico compuesto del bastidor y los mecanismos de desplazamiento.
- e) Se comprobará la interfaz de comunicación con una prueba de trabajo.
- f) Se construirá un equipo de corte por plasma y se evaluará su funcionamiento.

CAPÍTULO 2

En este capítulo se revisa la estructura funcional de la máquina, desde el momento de carga hasta la pieza cortada, las especificaciones, características y requerimientos que la máquina requiere para su funcionamiento; las alternativas de diseño de cada uno de los sistemas más importantes como son mecanismos de traslación, guías, control, soporte de antorcha, y demás elementos. Además se analiza la selección de la mejor alternativa utilizando el método de la matriz de decisión ponderada, el cual permite de una manera práctica dar la mejor opción para el diseño. Las alternativas consideradas para los mecanismos de transformación d movimiento circular a lineal son: cremallera – rueda, tornillo - tuerca. Para el sistema de alineación: guías redondas, guías tipo M o cuadradas. Para el soporte de antorcha se considera el uso de antorcha de sistemas de corte semiautomáticos y adaptación de la antorcha manual propia del equipo. Las alternativas para actuadores son: motores de pasos híbridos y servomotores AC Síncrono.

2.1. ESTRUCTURA FUNCIONAL

El concepto del modelo es basado en el sistema MECOMAT (Mechatronic compiler for machine tool); consiste en pasos progresivos para el desarrollo de máquinas herramientas, donde constan dos subprocesos, iniciando con las especificaciones del producto. En la figura 2.1 se indica los pasos a seguir para obtener un diseño óptimo de la máquina herramienta. La estructura funcional global de la máquina de corte se muestra en la figura 2.2 donde las entradas son el material, energía, señal y como resultado tenemos la pieza cortada. En la figura 2.3 se indica la función global, con actividades que van desde la colocación del material en la mesa, ubicación de la antorcha en el origen hasta iniciar los procesos de corte y obtener la pieza deseada.

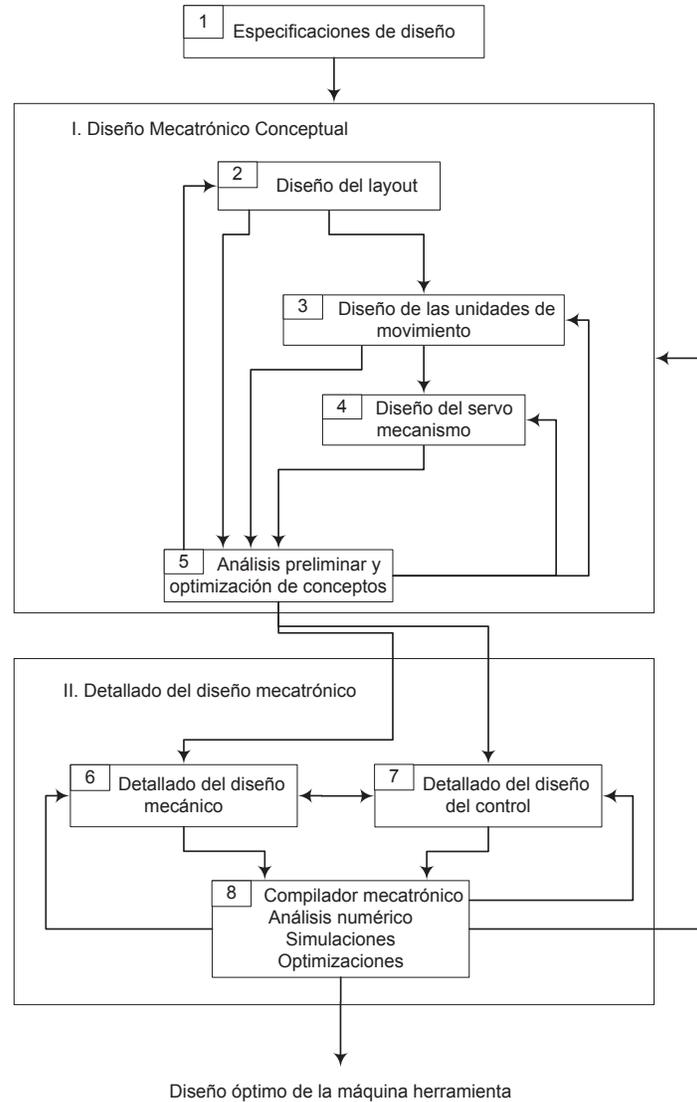


Figura 2.1. Flujo de procesos para el diseño de máquina herramienta (31).

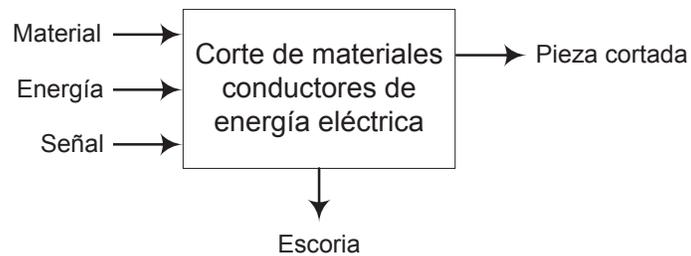


Figura 2.2. Estructura funcional global de la máquina de corte mediante plasma.

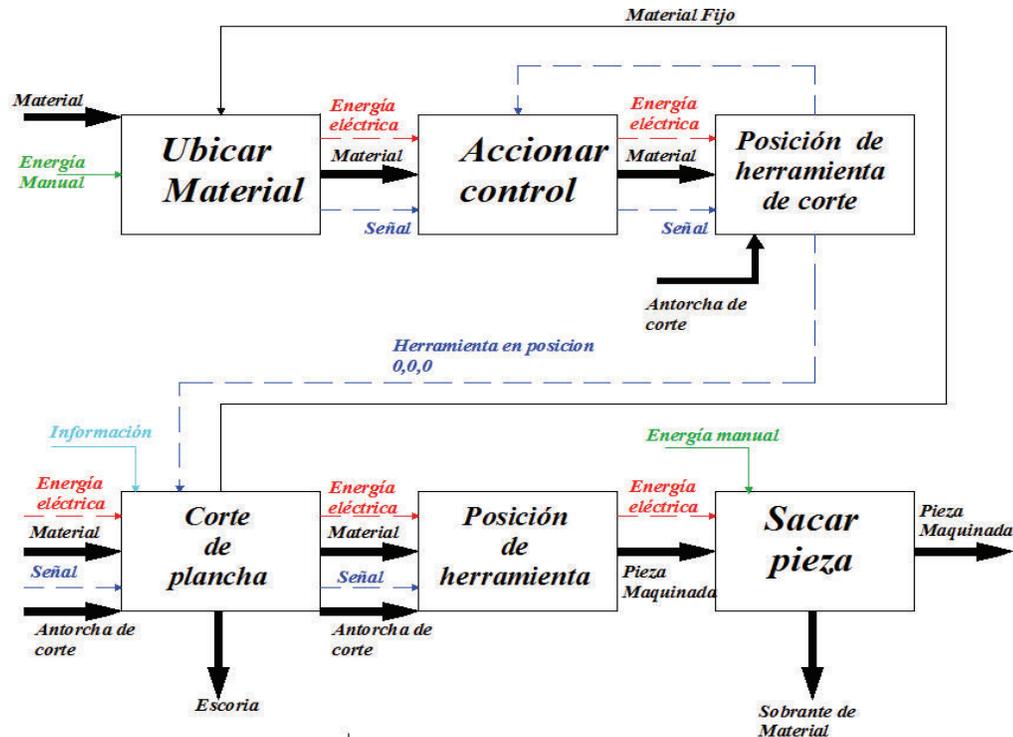


Figura 2.3. Estructura funcional y detalle de actividades específicas de la máquina de corte.

2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

2.2.1. Identificación de mercado

Existen equipos automáticos para el corte de planchas con plasma, que dependiendo de su capacidad tienen diferentes costos. Tales costos son relativamente altos, por esta razón se da lugar a la factibilidad de construcción de un equipo que realice las mismas funciones y con un costo de fabricación relativamente bajo. Para poder comparar los costos se cotiza máquinas con similares características en comparación con la que se pretende construir. El resumen de estos equipos se presenta en la tabla 2.1, donde son enfocadas las principales características de estas máquinas.

Tabla 2.1. Comparación entre las máquinas de corte automático mediante plasma existentes en el mercado.

ITEM					
Sistema mecánico					
Estructura móvil de soporte de antorcha	Tipo puente	Tipo puente	Tipo puente	Tipo puente	Tipo puente
Sistema de Trasmisión	Cadenas y piñones ejes X y Y, husillo de bolas	Cremallera	Cremallera y tornillos	Cadenas y piñones ejes X y Y, husillo de bolas	Cremallera
Sistema de engrase	No	Si	No	No	No
Antorchas de oxicorte	No	Si	No	No	Si
Mesa con agua	No	Opcional	Opcional	Opcional	Opcional
Filtro de polvo	No	No	No	No	Si
Tipo de anclaje	Apoyado sobre piso	Anclaje a piso con sistema de nivelación	Anclaje a piso con sistema de nivelación	Apoyado sobre piso	Anclaje a piso
Área útil de corte en la mesa (mm)	1300 x 2500	1500 x 3000	1220 x 2440	1300 x 2500	1500x2500
Velocidad máxima de avance (m/min)	20	30	7.8	20	30
Velocidad máxima de corte (m/min)	12	12	7.8	12	12
Sistema eléctrico y control					
Sistema Portacables	Si	Si	Si	Si	Si
Conexión eléctrica pantógrafo (V)	220	400	220	220	230
Motores	Servomotores DC. con encoder	Servomotores AC con encoder	Motores de paso híbridos	Servomotores DC. con encoder	Servomotores AC
software de control	Mach 3	Vintech RCAM-Lite v5	Mach 3	Mach 3	OmniWin 2011
Sistema Operativo	Windows 2000, XP, Vista, 7	Windows Embeded XP, Vista 32 y 64 Bit, Windows 7 32 y 64 Bit.	Windows XP, Vista, 7	Windows 2000, XP, Vista, 7	Windows Embeded XP, Vista 32 y 64 Bit, Windows 7 32 y 64 Bit.
Sensor de altura para la antorcha	Si	Si	Si (Adaptable)	Si	Si
Conexión de red ethernet	No	Si	No	No	Si
Asistencia remota por internet	No	Si	No	No	Si
Interface con usuario	Pc	Pantalla TFT táctil	Pc	Pc	Pantalla TFT táctil 15"
Memoria RAM mínima	512 Mb	1 Gb	1 Gb	512 Mb	1 Gb
Archivos compatibles	.dxf, .Ai, .CDR, .BMP, .JPEG, Adobe illustrator, Corel Drawn, Solid Works etc.	.dxf	.dxf, .Ai, .CDR, .BMP, .JPEG, Adobe illustrator, Corel Drawn.	.dxf, .Ai, .CDR, .BMP, .JPEG, Adobe illustrator, Corel Drawn, Solid Works etc.	.dxf, .dwg, .dwf, .ESSI, DIN, .XML
Velocidad de procesamiento mínima (GHz)	1	1	1,5	1	2
Plasma					
Marca de plasma	Cebora sound PC 10051/ T PFC	HyPerformace HPR260	Cebora sound PC 10051/ T PFC	Cebora sound PC 10051/ T PFC	HyPerformace HPR260
Espesor de máxima de corte (mm)	32	35	35	32	35
Presión de aire requerido (bar)	5	11	5	5	11
Caudal de aire requerido l/min	220	165	220	220	165
Servicio Técnico					
Garantía (años)	1	1	1	1	1
Asistencia remota	Si	Si	Si	Si	Si
Capacitación manejo de equipo	Si	Si	Si	Si	Si
Servicio de monitoreo durante la garantía	Si	Si	Si	Si	Si
Incluye equipo de plasma	No	Si	Se usara el existente	Si	Si
Costo	18000 USD	112837,4 USD	4990 USD	28817 USD	210931,5 USD

2.2.2. Identificación del producto

Tener un conocimiento que encierre todas las características físicas, técnicas y de funcionalidad, ayuda a comprender y tener un enfoque más explícito de lo que se pretende lograr. Para obtener un producto que cumpla con las necesidades establecidas, se deben seguir los lineamientos indicados en la identificación del producto, los cuales e indican a continuación:

- Nombre del producto: Equipo para corte de planchas mediante plasma, operado por computador

- Función básica: Corte planchas de hasta 2440 mm de largo, 1220 mm y 35 mm de espesor
- Características especiales del producto:
 - Proceso de corte automatizado
 - Herramienta de corte: Antorcha de equipo de plasma
- Características de interfaz de control por el usuario (32)
 - Nombre del software: Mach3
 - Versión: R3.043.066 o superior
 - Idioma: Inglés
 - Sistema operativo: Windows 2000, Windows XP, Windows Vista o Windows 7
 - Para versión 32 bits: Utiliza un puerto paralelo
 - Para versión 64 bits: Utiliza un controlador de movimiento externo
 - Memoria RAM mínima: 512 MB
 - Velocidad mínima del procesador: 1GHz, mínimo Pentium 4
 - Admite el ingreso de datos en forma manual
 - Control de velocidad de tres de ejes
 - Permite la visualización de códigos de control numérico
- Aplicación de sistemas CAD-CAM (33)
 - Nombre del software: BobCAD - CAM
 - Versión: 23 o superior, para 32 bits o 64 bits, según equipo disponible
 - Sistema operativo: Windows XP, Windows Vista, Windows 7
 - Memoria RAM mínima: 2 GB
 - Velocidad mínima del procesador: 2 GHz
 - Adaptador de gráficas Open GL 1.1: 512 MB
 - Permite la importación de archivos dxf, en general
 - Creación de entidades, modificar puntos, opciones de maquinado, líneas, arcos, circunferencias, curvas.
 - Generación de códigos NC
- Principales objetivos de desempeño

Lograr un alto grado de precisión en los cortes, con un rango de tolerancia de ± 1.2 a ± 2 mm en espesores de 4 a 35 mm (5 págs. 22-23)

Precisión de posicionamiento: 0.2 mm

Obtener una calidad aceptable en los bordes de cortados de las piezas con un rango de rugosidad de 70 a 120 μm en espesores de 4 a 35 mm (5 pág. 49)

Incremento de la producción aproximadamente: 80% en planchas de acero y 40% en planchas de aluminio (34 pág. 49) (2 págs. 633-634)

Controlar automáticamente el movimiento a lo largo de tres ejes con motores individuales de acuerdo al perfil a ser cortado

Ofrecer una estructura tipo puente que soporte el movimiento, el equipo de corte y su propio peso

Incluir un sistema de nivelación para la estructura, durante el montaje; para nivelar la estructura de la máquina, debe usarse niveles de burbuja grado II con una tolerancia de 0.2 a 0.4 mm/m (35 pág. 37)

Incluir guías paralelas a los mecanismos de movimiento, con el objetivo de asegurar la estabilidad y precisión del movimiento para el corte

- Ambiente de servicio (36)

Superficie de soporte firme y nivelado

Apoyos de mesa firmes, sujetos al piso

Control numérico computarizado

Lugar de trabajo bajo techo, seco y libre de sustancias inflamables

Alimentación trifásica: 208/220/230 V – 60 Hz

Regulación de corriente: 20/80 A

Datos del generador de plasma:

Corriente de corte:

a) 100 A a 400/440V

b) 80 A a 208/220/230 V

Factor de servicio o de trabajo.- Da el porcentaje de 10 minutos en el que el aparato puede trabajar a una determinada corriente de corte y tensión U2 sin causar recalentamientos

a) 80 A \rightarrow 35%

b) 65 A → 60%

c) 58 A → 100%

Potencia absorbida:

a) 35 % → 13.6 kVA

b) 60 % → 11.1 kVA

c) 100 % → 9.9 kVA

- Consumo de aire: 220 l/min con una presión de 0.5 MPa

2.2.3. Descripción física

- Equipo para corte de planchas estándar con espesores de 4 a 30 mm máximo 35 mm
- Herramienta de corte: Antorcha plasma Cebora, con mangueras flexibles de 6 m de longitud
- Desplazamientos controlados en los ejes X, Y, Z, que sean capaz de cubrir el corte de planchas de 2.44x1.22 m sin dificultad, la altura desde el piso hasta la cara superior de la plancha será aproximadamente 700 mm, con una tolerancia de ± 50 mm
- Control de movimiento automático de la antorcha de corte con mecanismos que cumplan con la tolerancia fundamental IT7 (37 pág. Sección octava)
- Proceso de trabajo controlado por computador a través de la interfaz gráfica: CNC – PC con el usuario
- Espacio físico mínimo requerido: 5 m x 4 m

2.3. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

En esta sección se describen las alternativas a ser analizadas, mismas que serán seleccionadas para obtener un diseño óptimo de la mesa de corte. El método de selección es el denominado matriz de decisión ponderada, donde se valoran los criterios de evaluación de alternativas, de las cuales las que tienen mayor puntuación son las seleccionadas. En la tabla 2.2, se muestran las alternativas consideradas para las partes a conformar la mesa de corte.

Tabla 2.2. Resumen de alternativas seleccionadas.

Partes		Alternativa 1	Gráfico	Alternativa 2	Gráfico	Alternativa 3	Gráfico
Transmisión de movimiento	Eje X	Tornillo - Tuerca de bolas	 (38 pág. 4/28)	Cremallera – Rueda	 (39)	Tornillo rosca cuadrada - tuerca	
	Eje Y						
	Eje Z						
Sistema de guiado	Eje X	Guías redondas	 (40)	Guías tipo M o cuadradas	 (41)	N/A	N/A
	Eje Y						
	Eje Z						
Soporte antorcha		Adaptación de antorcha manual	 (42)	Adaptación de antorcha de sistemas semi automáticos	 (43)	N/A	N/A
Sistema de accionamiento		Motores de paso híbridos	 (44)	Servomotores AC Síncrono	 (45)	N/A	N/A

2.4. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Para las alternativas de diseño se considera varias opciones, las que dependiendo del costo y su funcionalidad serán evaluadas, de acuerdo a criterios propuestos y ponderaciones dadas a los mismos. Se debe tener en claro que las alternativas que sean seleccionadas sean fáciles de conseguir ya sea por medio de la compra o fabricación de las partes. La alternativa seleccionada debe ser diseñada con el criterio de sea fácil de montar y fabricar. Los criterios a ser evaluados se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Criterios a ser evaluados para diferentes partes de mesa de corte

Criterio	Partes			
	Transmisión de movimiento	Sistema de Guiado	Soporte Antorcha	Sistema de Accionamiento
Facilidad de montaje y desmontaje: Al momento de ensamblar los mecanismos de movimiento en cada eje, estos deben tener la característica de ensamblar con facilidad, y de ser necesario el desmontaje también de poseer la misma característica.	Aplica	Aplica	Aplica	No aplica
Baja complejidad constructiva: La complejidad de las partes que conforman el mecanismo de movimiento lineal, afecta directamente a los costos finales del equipo, por lo tanto si son más sencillos y funcionales; los costos son menores y permite una facilidad de montaje y desmontaje.	Aplica	Aplica	Aplica	No aplica
Facilidad de mantenimiento: El mantenimiento define la vida útil de los elementos que conforman los mecanismos de recorrido en los ejes X-Y-Z; siendo estos ejes los más importantes dentro del sistema mecánico, debe presentar las facilidades para el mantenimiento, cuando sea necesario.	Aplica	Aplica	No aplica	Aplica
Valor económico: La valoración económica de cada elemento define el costo final del sistema, por lo que se ve la necesidad de ponderar a cada alternativa según el costo.	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica
Resistencia a la vibración y pandeo: Para obtener una calidad aceptable en los cortes y en sí mismo el funcionamiento adecuado de cada uno de los ejes de movimiento, es necesario que estos tengan capacidad de resistir la flexión y el pandeo con o sin carga de trabajo.	Aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Rigidez y precisión: Debe tener capacidad de soportar cargas durante el proceso de corte sin vibraciones ni movimientos que interfieran en la operación, al mismo tiempo debe tener una precisión que permita realizar piezas con exactitud detallada en las especificaciones.	No aplica	Aplica	No aplica	No aplica
Facilidad de movimiento: La fricción que existe entre los elementos debe ser reducida seleccionando de la mejor manera la guía, la cual existen varios modelos que permiten reducir totalmente el rozamiento y ser muy eficientes en operación.	No aplica	Aplica	No aplica	No aplica
Suavidad y precisión en el movimiento: Los cables y mangueras de fluidos no deben interferir en el movimiento.	No aplica	No aplica	Aplica	No aplica
Ruido: El ruido puede afectar al operador de la máquina herramienta, por lo que es necesario que el motor genere la menor cantidad de ruido.	Aplica	No aplica	No aplica	Aplica
Eficiencia mecánica: De la eficiencia también depende el dimensionamiento de otros elementos que trabajan en conjunto.	Aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Torque elevado a altas velocidades: En este tipo de sistema la velocidad es importante para el corte de la plancha, el motor debe brindar una velocidad adecuada de acuerdo al material y al espesor a cortar.	No aplica	No aplica	No aplica	Aplica
Espacio físico: Con el objetivo de disminuir el espacio físico de la máquina, es deseable que el motor tenga una capacidad de espacio adecuado; esto ayuda a que el montaje y mantenimiento sea relativamente fácil.	No aplica	No aplica	Aplica	Aplica

2.5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.5.1. Transmisión de movimiento

El perfil de determinado elemento, se sigue de acuerdo al movimiento circular de los motores, el cual es transformado a movimiento lineal por medio de mecanismos como puede ser: cremallera - rueda, tornillo - tuerca, o tornillo de bolas-tuerca. Las principales características de estos mecanismos de transformación de movimiento giratorio a lineal, se indica en la tabla 1.10 del capítulo 1. En la figura 2.4 se muestra los árboles objetivo con los criterios ponderados para los ejes X, Y, Z, y los resultados de la ponderación se muestran en las tablas 2.4 y 2.5, para los elementos de movimiento de los ejes X, Y, Z.

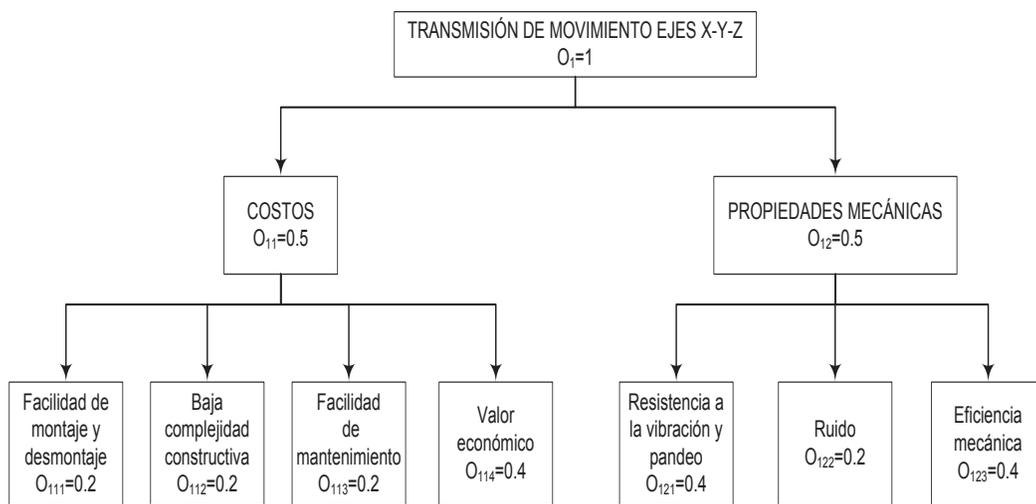


Figura 2.4. Árbol objetivo para la selección de mecanismos ejes X, Y y Z.

Tabla 2.4. Matriz de decisión ponderada para la selección de mecanismo en los ejes X - Y.

Criterio de diseño	Factor de	Tornillo - tuerca de bolas		Rueda - cremallera		Tornillo rosca cuadrada - tuerca	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de montaje y desmontaje	0.10	6	0.60	8	0.80	6	0.60
Baja complejidad constructiva	0.10	4	0.40	7	0.70	4	0.40
Facilidad de mantenimiento	0.10	6	0.60	8	0.80	8	0.80
Valor económico	0.20	4	0.80	7	1.40	7	1.40
Resistencia a la vibración y pandeo	0.20	5	1.00	9	1.80	6	1.20
Ruido	0.10	6	0.60	7	0.70	5	0.50
Alta eficiencia	0.20	9	1.80	7	1.40	5	1.00
		Σ	5.80	Σ	7.60	Σ	5.90

Tabla 2.5. Matriz de decisión ponderada para la selección de mecanismo en el eje Z.

Criterio de diseño	Factor de	Tornillo - tuerca de bolas		Rueda - cremallera		Tornillo rosca cuadrada - tuerca	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de montaje y desmontaje	0.10	6	0.60	6	0.60	8	0.80
Baja complejidad constructiva	0.10	4	0.40	7	0.70	7	0.70
Facilidad de mantenimiento	0.10	6	0.60	8	0.80	8	0.80
Valor económico	0.20	4	0.80	8	1.60	9	1.80
Resistencia a la vibración y pandeo	0.20	9	1.80	9	1.80	9	1.80
Ruido	0.10	7	0.70	7	0.70	7	0.70
Alta eficiencia	0.20	9	1.80	7	1.40	6	1.20
		Σ	6.70	Σ	7.60	Σ	7.80

2.5.2. Sistema de guiado

Las guías dan precisión al movimiento, por tal motivo la selección del sistema adecuado depende la precisión del corte de determinada pieza. Las ventajas y desventajas de los dos tipos de guías considerados: redondas y cuadradas, se indican en la tabla 1.11 del capítulo 1. En la figura 2.5 se muestra el árbol objetivo con los criterios ponderados para las guías de los ejes X, Y y Z, los resultados de la ponderación se muestra en la tablas 2.6.

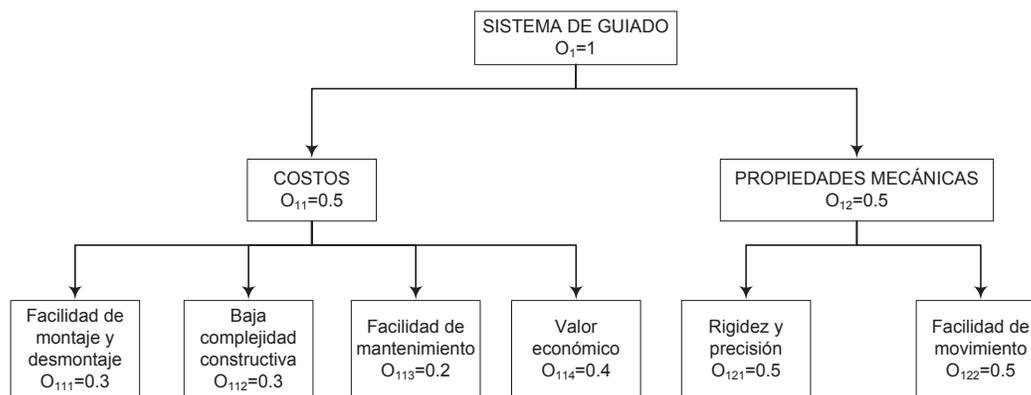


Figura 2.5. Árbol objetivo para la selección de guías.

Tabla 2.6. Matriz de decisión ponderada para la selección de guías.

Criterio de diseño	Factor de	Tipo M o cuadradas		Redondas	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de montaje y desmontaje	0.15	7	1.05	6	0.90
Baja complejidad constructiva	0.15	5	0.75	8	1.20
Facilidad de mantenimiento	0.10	6	0.60	8	0.80
Valor económico	0.20	4	0.8	8	1.60
Rigidez y precisión	0.25	8	2.0	7	1.75
Facilidad de movimiento	0.25	8	2.0	8	2.00
		Σ	7,20	Σ	8.25

2.5.3. Soporte de antorcha

El soporte de la antorcha de corte debe ser adaptado al sistema de movimiento, para lo cual es necesario seleccionar el soporte adecuado. Las alternativas consideradas son: adaptación de soporte a manija de antorcha manual, mostrado en la figura 2.6; y adaptación de la antorcha de sistema semiautomático, mostrado en la figura 2.7. El árbol objetivo para la evaluación de alternativas indicadas se muestra en la figura 2.8 y los resultados de ponderación en la tabla 2.7.



Figura 2.6. Antorcha manual adaptada al sistema de corte automático (42)



Figura 2.7. Antorcha industrial adaptada al sistema de corte automático (43)

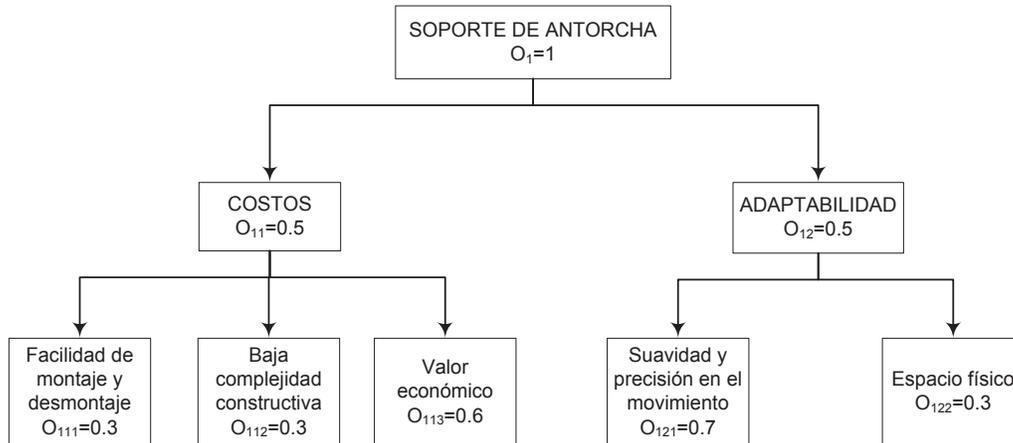


Figura 2.8. Árbol objetivo para la selección de soporte de antorcha.

Tabla 2.7. Matriz de decisión ponderada para la selección de soporte de antorcha.

Criterio de diseño	Factor de Peso	Adaptación antorcha manual existente		Adaptación de antorcha de sistemas semiautomáticos	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de montaje y desmontaje	0.15	7	1.05	8	1.20
Baja complejidad constructiva	0.15	7	1.05	7	1.05
Valor económico	0.30	9	2.70	4	1.20
Suavidad y precisión en el movimiento	0.35	7	2.45	8	2.80
Espacio físico	0.15	7	1.05	8	1.20
		Σ	8.30	Σ	7.45

2.5.4. Actuadores

El movimiento de los tres ejes para la mesa de corte se realiza con motores ya sean de pasos o servomotores. En las tablas 1.8 y 1.9 del capítulo 1, se mostraron las características de estos dos tipos de actuadores: servomotores y motores de paso. Según los parámetros de la tabla 2.2, se evaluará y seleccionará la mejor opción para la aplicación en el movimiento de los tres ejes de la mesa de corte. En la figura 2.9 se muestra el árbol objetivo para la evaluación de alternativas y en la tabla 2.8 se indica los resultados de la ponderación.

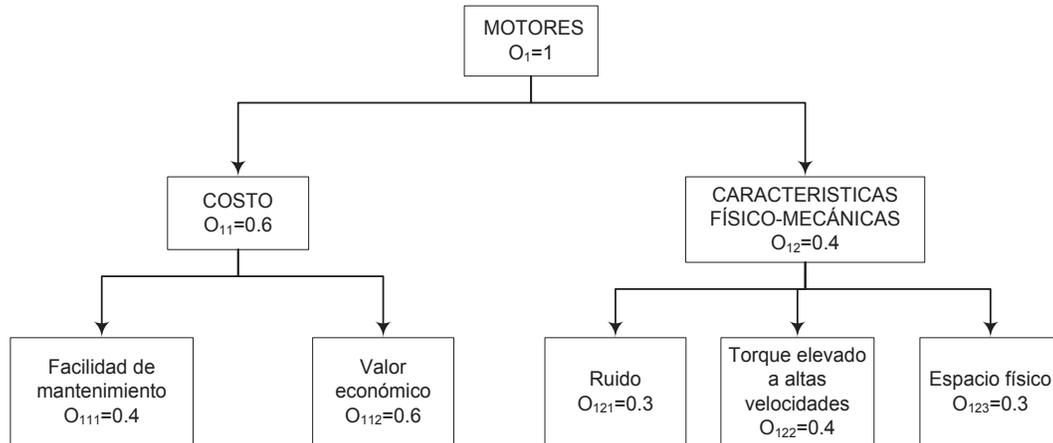


Figura 2.9. Árbol objetivo para la selección de motores.

Tabla 2.8. Matriz de decisión ponderada para la selección de motores.

Criterio de diseño	Factor de Peso	Servo motor AC síncrono		Motor de pasos híbrido	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de mantenimiento	0.24	6	1.44	8	1.92
Valor económico	0.36	5	1.80	9	3.24
Ruido	0.12	6	0.72	6	0.72
Torque elevado a altas velocidades	0.16	8	1.28	6	0.96
Espacio físico	0.12	7	0.84	9	1.08
		Σ	6.08	Σ	7.92

2.5.5. Resumen de selección de alternativas

Según el método de matriz de decisión ponderada, se selecciona un conjunto de alternativas que conducen a un diseño preliminar. Las alternativas seleccionadas se resumen en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Resumen de alternativas seleccionadas.

Partes		Alternativa seleccionada	Gráfico
Transmisión de movimiento	Eje X Eje Y	Cremallera - Rueda	 <p>(22)</p>
	Eje Z	Tornillo - Tuerca	
Sistema de guiado	Eje X Eje Y Eje Z	Guías redondas	 <p>(40)</p>
Soporte antorcha		Adaptación de antorcha manual	 <p>(42)</p>
Sistema de accionamiento		Motores de paso híbridos	

2.6. DISEÑO PRELIMINAR

Con las dimensiones generales, las alternativas definidas y las especificaciones se obtienen un diseño preliminar de la máquina a ser fabricada. Este diseño da la idea aproximada de cómo se fabricaría la mesa, y a su vez ayuda para el diseño final de la máquina. Es decir, se identifica por completo el producto. Por medio de este también se puede definir espacio físico necesario; construir un prototipo virtual o prototipo físico a escala con el objetivo de identificar procesos de fabricación y de montaje. Se puede también dar soluciones a inconvenientes en la etapa de planificación. Se considera dos opciones para el diseño preliminar, los cuales son mostrados en los anexos 5 y 6. La descripción de estas dos alternativas se indica en la tabla 2.8. Según lo indicado en la tabla 2.10, la opción 2 es la más adecuada para ser desarrollada para un diseño final. La descripción grafica de la opción seleccionada se muestra en la figura 2.10.

Tabla 2.10. Descripción de alternativas de diseño preliminar de la mesa de corte.

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
Opción 1	Estructura conformada por 6 columnas, con vigas longitudinales y transversales, con 3 sistemas de guiado para el eje X, 2 para el eje Y, y 2 para el eje Z. Soporte de mecanismo eje X robusto y alto con respecto al nivel de la plancha a ser cortada. La plancha a ser cortada se soporta en platinas distribuidas en la cama de la plancha a ser cortada. Soportes en piso nivelables.	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rigidez. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de mayor capacidad de motores y mayor longitud de mecanismo eje Z. • Constituye mayor peso en acero, por lo tanto mayor costo. • Guías en eje X, corresponde a 3, mayor costo. • Mayor ocupación de espacio físico. • Construcción de mayor cantidad de elementos en comparación a la opción 1.
Opción 2	Estructura conformada por 4 columnas, con vigas longitudinales y transversales, con 2 sistemas de guiado para el eje X, 2 para el eje Y, y 2 para el eje Z. Soporte de mecanismo eje X adecuado. La plancha a ser cortada se soporta en platinas distribuidas en la cama de la plancha a ser cortada. Soportes en piso nivelables.	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de menor capacidad de motores. • Constituye menor peso en acero, por lo tanto menor costo, en comparación con la opción 1. • Guías en ejes cantidad óptima para cada eje. • Menor ocupación de espacio físico. 	

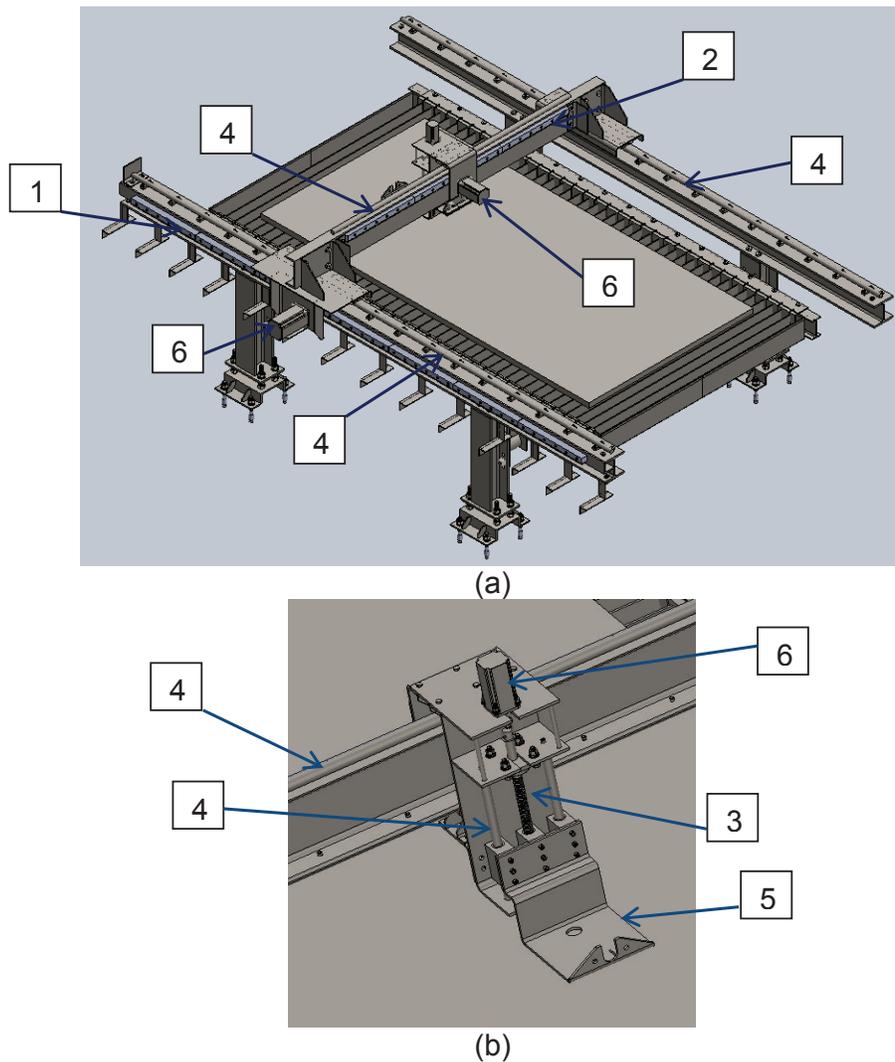


Figura 2.10. Identificación de alternativas seleccionadas.

1.- Transmisión de movimiento eje X, rueda cremallera. 2.- Transmisión de movimiento eje Y, rueda cremallera. 3.- Transmisión de movimiento eje Z, tornillo tuerca. 4.- Sistema de guías, barras redondas, 5.- Adaptación de antorcha manual. 6.- Sistema de accionamiento, motores de paso. (a) Vista general, (b) Acercamiento a mecanismo Y - Z.

CAPÍTULO 3

La selección de mecanismos de transformación de movimiento circular a lineal, se analizó en el capítulo 2; en este capítulo se dimensiona los elementos que conforman los tales mecanismos y se seleccionan los actuadores. El diseño de partes mecánicas se realiza por medio de elementos finitos, mientras que para la estructura de la mesa se analiza por medio de elementos estructurales con matrices de rigidez. El análisis y la selección de elementos de ajuste son por medio de un proceso analítico. Los resultados obtenidos indican que el factor de seguridad mínimo es de 5 para cargas dinámicas y de 6 para cargas estáticas, estos factores son mayores para los demás elementos.

3.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO Y GUÍAS

Los sistemas seleccionados para los movimientos en cada eje consisten en los siguientes: eje Z: tornillo rosca cuadrada y tuerca, guiado con ejes laterales y seguidores o patines de guías; eje Y: cremallera y rueda dentada, guiado con ejes y ruedas de guía; eje X: cremallera y rueda dentada, guiado con ejes y ruedas de guía. La velocidad máxima de desplazamiento para los ejes Y y X, es de 130 mm/s, se considera esta velocidad para el corte de planchas de aluminio de 6 mm, esta velocidad cubre los espesores de materiales de acero negro e inoxidable hasta los 35 mm. En los ejes Y y X, el control de velocidad y posición es imprescindible; mientras que para el eje Z, es necesario controlar la posición y no la velocidad. Luego de un proceso de selección previa de características mecánicas, se ha utilizado para el diseño de sistemas de transmisión de movimiento, los motores que económicamente convienen al proyecto.

3.2. DISEÑO DE ELEMENTOS MECÁNICOS

La mesa de corte mediante plasma se tiene tres ejes, los cuales son descritos a continuación: eje vertical o eje Z, responsable de subir y bajar la antorcha de corte; eje transversal o eje Y, responsable de llevar la antorcha en el lado transversal de la plancha; eje longitudinal o eje X, responsable de llevar la antorcha a lo largo de la plancha. El perfil característico de funcionamiento, específicamente para los ejes Y y X, es de tipo trapezoidal, puesto que en cada

motor solo es necesario mover el peso de cada uno de los elementos que conforman los soportes y mecanismos de movimiento, en su respectivo eje; es decir no existen fuerzas adicionales que ejercen directamente en contacto con la pieza de trabajo, como por ejemplo una unidad de taladrado o fresado CNC. En la figura 3.1, detalla el perfil de funcionamiento aplicado a los ejes Y y X. En el eje Z, no es necesario controlar la velocidad de la antorcha, solo la posición de la misma. El procedimiento de selección de motores y diseño de elementos mecánicos se muestran en la figura 3.2.

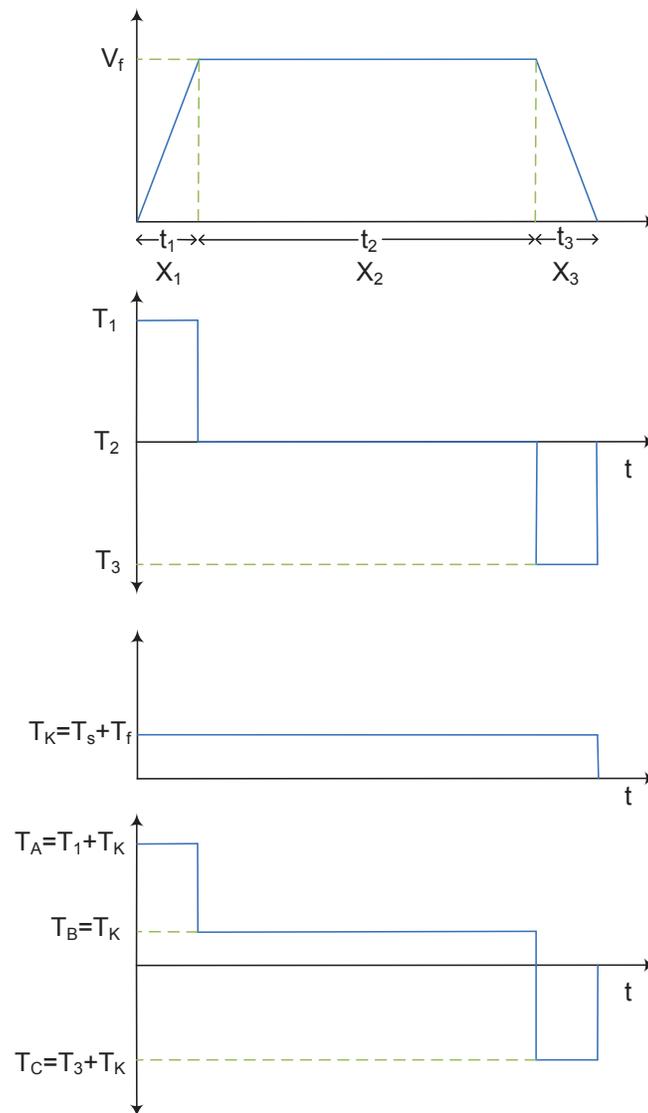


Figura 3.1. Perfil de funcionamiento o de trabajo para los ejes de movimiento en el corte mediante plasma.

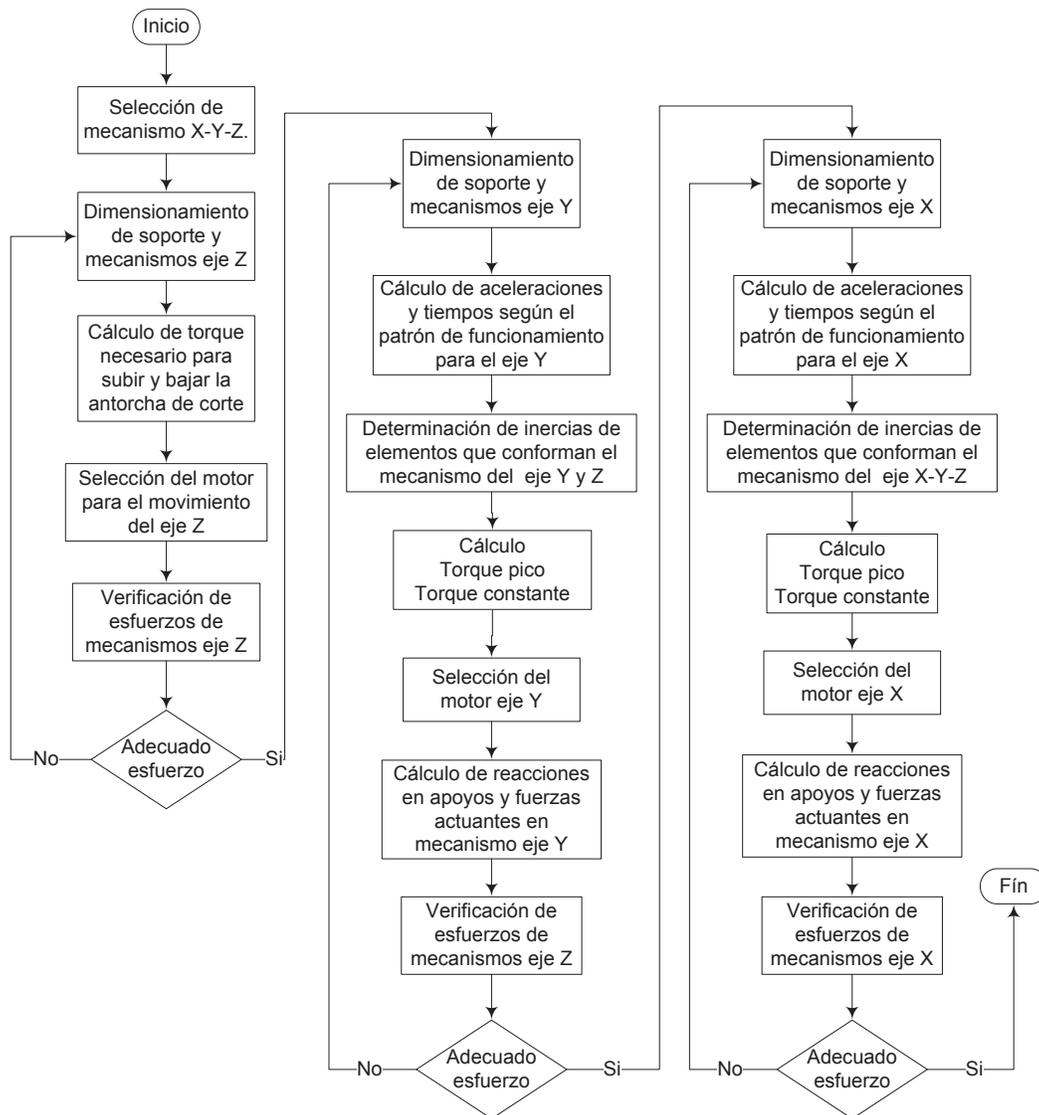


Figura 3.2. Proceso de selección de motores y diseño de elementos mecánicos.

3.2.1. Diseño de elementos de movimiento en el eje Z

3.2.1.1. Cálculo de fuerzas y selección del motor

El eje Z, sube y baja la antorcha de corte. La transmisión de movimiento es por medio de tornillo sin fin y tuerca, guiado por barras redondas como se muestra en la figura 3.3. El peso para el análisis, consiste en: cables y de mangueras de fluidos 117.6 N: (12 kg); elementos mecánicos de movimiento para este eje 101.43 N (10.35 kg). En la tabla 3.2, se muestra los cálculos para la selección del motor del eje Z.

- Tornillo rosca cuadrada $\Phi \frac{3}{4}$ " (2), longitud 362 mm y guías redondas $\Phi \frac{3}{4}$ " (1), longitud 296 mm.- Acero AISI 1018, resistencia última 400 MPa, resistencia a la fluencia 220 MPa. En la tabla 3.1, se indican las características geométricas del tornillo.

Tabla 3.1. Dimensiones para el tornillo rosca cuadrada de diámetro $\frac{3}{4}$ ".

Tamaño (46 pág. 319)		Hilos por pulgada	Diámetro menor	
pulgadas	mm		pulgadas	mm
3/4	19.05	5	0.575	14.6

- Tuerca rosca cuadrada para tornillo $\Phi \frac{3}{4}$ " (4), longitud 80 mm y patines (3), longitud 80 mm.- Bronce SAE 65, resistencia última 305 MPa, resistencia a la fluencia 150 MPa.

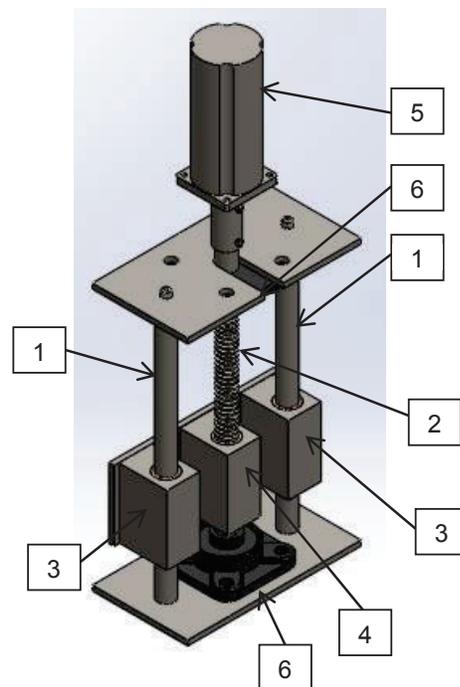


Figura 3.3. Elementos mecánicos para movimiento en el eje Y.
1: guías redondas, 2: tornillo rosca cuadrada, 3: patín de guías, 4: tuerca, 5: motor, 6: chumaceras.

Tabla 3.2. Cálculo de parámetros para la selección de motor del eje Z.

Datos		Ecuación		Resultado
Diámetro de paso	$dp = 0.6624 \text{ in}$	Ángulo de avance	$\tan \lambda = \frac{1}{n\pi dp}$ (47 pág. 701)	$\tan \lambda = 0.0961$
Numero de roscas por pulgada	$n = 5$			
Masa a mover	$m_z = 219 \text{ N}$	Torque para subir la carga	$T_B = \frac{m_z dp}{2} \left[\frac{\tan \lambda + f}{1 - f \tan \lambda} \right]$ (47 pág. 702)	$T_{UP} = 0.365 \text{ N m} = T_K$
Diámetro de paso	$dp = 0.6624 \text{ in}$			
Coefficiente de fricción	$f = 0.1$ (48 pág. 88)			
Masa a mover	$m_z = 219 \text{ N}$	Torque para bajar la carga	$T_B = \frac{m_z dp}{2} \left[\frac{f - \tan \lambda}{1 + f \tan \lambda} \right]$ (47 pág. 702)	$T_{DW} = 7 \times 10^{-2} \text{ N m}$
Diámetro de paso	$Dp = 0.6624 \text{ in}$			
Coefficiente de fricción	$f = 0.1$ (48 pág. 88)			
Preselección del motor LONGS 23HS9430 $T_p = 3 \text{ N m}$, $m_M = 1.6 \text{ kg}$, $I_R = 9 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$				
CÁLCULO DE TORQUE DE SALIDA DEL MOTOR LONGS 23HS9430				
Datos		Ecuación		Resultado
Precisión de posicionamiento máxima	$Ap_{\max} \leq 0.2 \text{ mm}$	Precisión de posicionamiento para el eje Z	$Ap = \frac{\text{Avance}}{R}$	$Ap = 0.013$ $Ap \leq 0.2 \text{ mm} \Rightarrow \text{ok}$
Resolución del motor	$R = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			
Paso del tornillo rosca cuadrada eje Z	$p = 5.08 \text{ mm}$			
Resolución del controlador	$R = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$	Frecuencia de pulsos	$f_p = R \omega$	$f_p = 400 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$
Velocidad angular	$\omega = 1 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$			
Frecuencia de pulsos	$f_p = 400 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$	Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fp} = \frac{\pi f_p}{2}$ (49 pág. 62)	$\omega_{fp} = 628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Tensión de funcionamiento	$V_{DC} = 30 \text{ V}$	Componente fundamental de voltaje, con dos fases encendidas	$V = \frac{4V_{DC}}{\pi}$ (49 pág. 64)	$V = 38.2 \text{ V}$
Torque pico	$T_p = 3 \text{ N m}$	Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 1.4 \frac{2\sqrt{2}T_p}{\pi}$ (49 pág. 70)	$T_{PB} = 3.78 \text{ N m}$
Resistencia de fase	$R = 2.1 \Omega$ Dato motor	Flujo magnético	$\Psi_M = \frac{T_{PB} R}{pV}$ (49 pág. 70)	$\Psi_M = 0.004 \text{ Wbt}$
Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 3.78 \text{ N m}$			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Componente fundamental de voltaje	$V = 38.2 \text{ V}$			
Resistencia de fase	$R = 2.1 \Omega$ Dato motor	Torque de salida a $R = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$	$T_S = \frac{p\Psi_M V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{p\omega\Psi_M^2 R}{(R^2 + \omega^2 L^2)}$ (49 pág. 66)	$T_S = 1.285 \text{ N m}$
Inductancia	$I = 0.009 \text{ H}$ Dato motor			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Flujo magnético	$\Psi_M = 0.004 \text{ Wbt}$			
Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fp} = 628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$			
Componente fundamental de voltaje	$V = 38.2 \text{ V}$			
Selección del motor LONGS 23HS9430		$T_p = 3 \text{ N m} \geq T_S = 1.285 \text{ N m} > T_K = 0.365 \text{ N m} \Rightarrow \text{Si}$		

3.2.1.2. Análisis de esfuerzos

La verificación de la resistencia del tornillo rosca cuadrada y de las guías, se realiza por medio del método de los elementos finitos con el programa SolidWorks. Se verifica los tres elementos que conforman el mecanismo de movimiento y guiado del eje Z, puesto que tanto el tornillo y las guías soportan al mismo tiempo el peso total a ser trasladado. El centro de masa de las partes móviles se localiza 102 mm del centro del tornillo. Se considera esta excentricidad, puesto que esta separación produce un incremento de esfuerzos hacia el tornillo y las guías. La aplicación de esta carga en el programa se realiza con la opción: asignación de carga remota; los resultados se muestran en la figura 3.4. Las consideraciones antes mencionadas se aplican también a la tuerca y a los patines de las guías; los resultados de análisis para estos elementos se detallan en la figura 3.5.

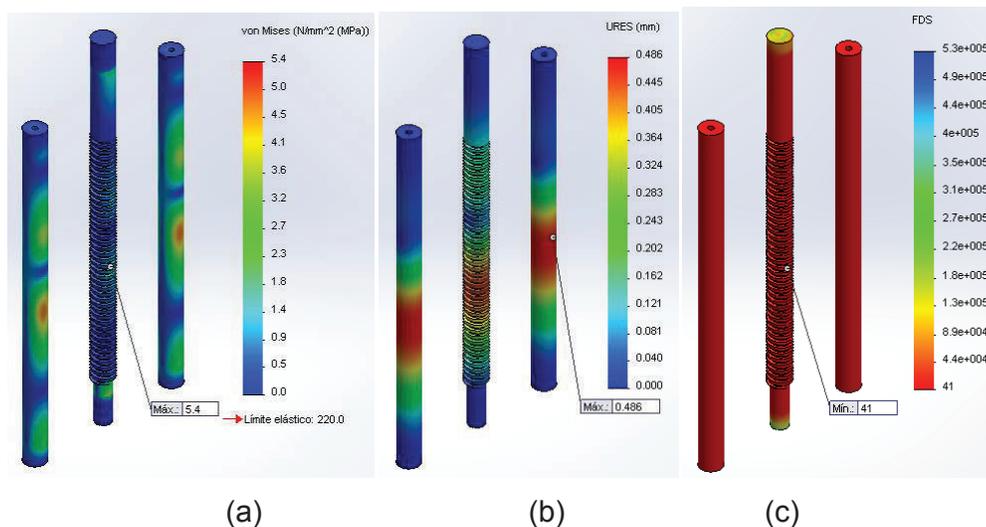


Figura 3.4. Datos de salida: tornillo y guías para el eje Z.
a) Esfuerzos de Von Mises, b) Desplazamientos, c) Factor de seguridad.

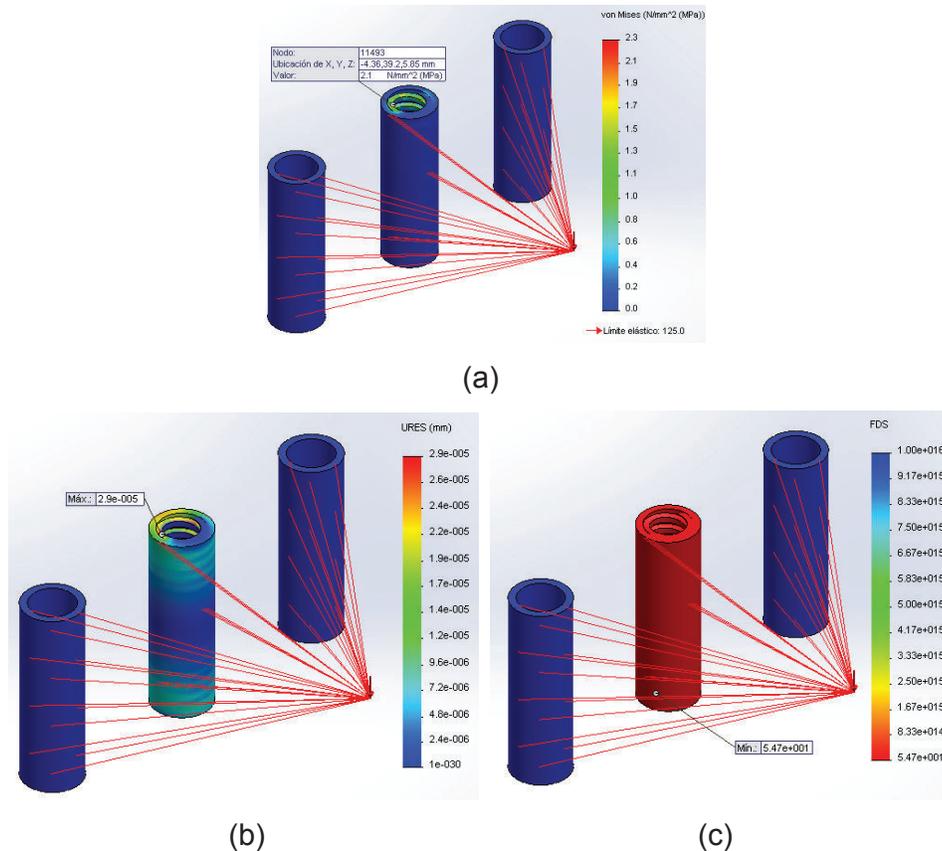


Figura 3.5. Datos de salida: tuerca y patines de guías para el eje Z.
a) Esfuerzos de Von Mises, b) Desplazamientos, c) Factor de seguridad.

3.2.2. Diseño de elementos de movimiento en el eje Y

Traslada las estructuras soporte, tanto del mecanismo del eje Z como del eje Y. La transmisión de movimiento es por medio de rueda y cremallera; guiado por barras redondas como se muestra en la figura 3.6. El peso total de esta partes de es de 40.96 kg, incluye todos los elementos del eje Z: peso de la antorcha, peso de la estructura, no incluye el peso del motor del eje Y. El material definido para los elementos 1, 2, 3 y 4, según la figura 3.6, es el siguiente:

- Rueda dentada, paso diametral 14, ángulo de presión 14.5°, número de dientes 47 (1).- Hierro gris ASTM 40, límite de compresión 965 MPa, límite de tensión 293 MPa.
- Cremallera, paso diametral 14, ángulo de presión 14.5° (2).- Acero AISI 1045, resistencia última 565 MPa, resistencia a la fluencia 310 MPa.
- Guías redondas Φ 1", longitud 1760 mm, (3).- Acero AISI 1018, resistencia última 400 MPa, resistencia a la fluencia 220 MPa.

- Ruedas de guías (4).- Bronce SAE 65, resistencia última 305 MPa, resistencia a la fluencia 150 MPa.

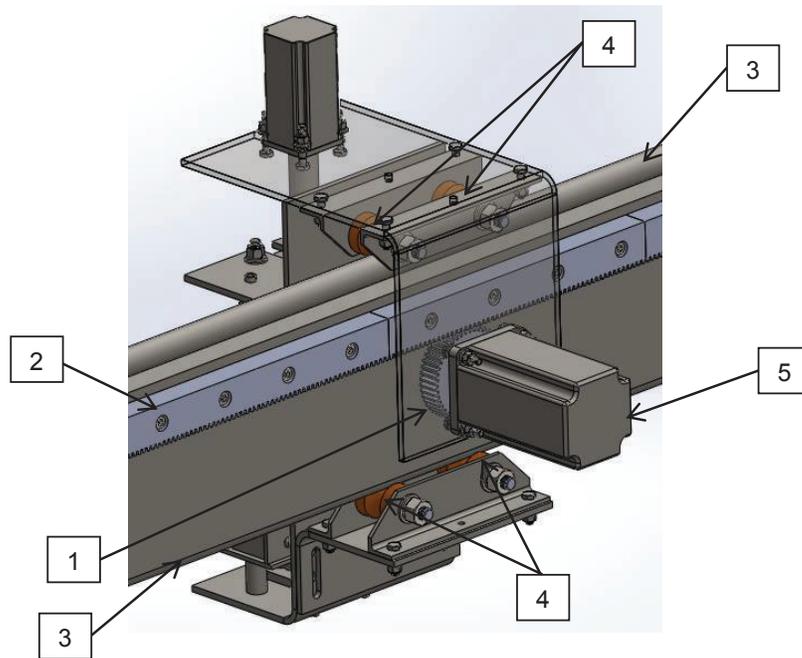


Figura 3.6. Elementos mecánicos para movimiento en el eje Y.
1: rueda dentada, 2: cremalleras, 3: guías redondas, 4: ruedas, 5: motor.

3.2.2.1. Análisis de movimiento

El perfil característico de funcionamiento para el eje Y, se muestra en la figura 3.1. Es necesario calcular el torque para romper la inercia en estado estático de los elementos que conforman este eje, así como también la fuerza de fricción, en función de los tiempos y espacios de operación.

- **Cálculo de velocidades, aceleraciones y tiempo**

La longitud neta de traslación para el eje Y: 1560 mm, distancia para acelerar y desacelerar: $X_1 = X_3 = 100$ mm, velocidad máxima de trabajo: 130 mm/s. Para el cálculo de velocidades y aceleraciones, es necesario conocer el diámetro de paso de la rueda dentada del eje Y; este valor se indica en la figura 3.7. En la tabla 3.3, se muestran los resultados de análisis de movimiento.

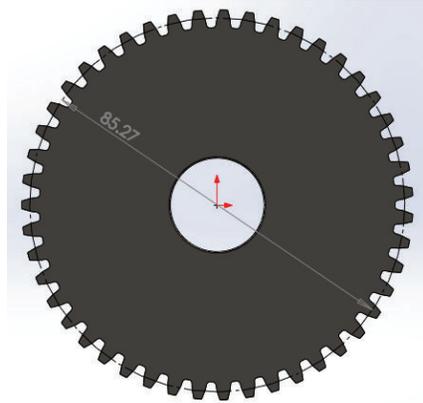


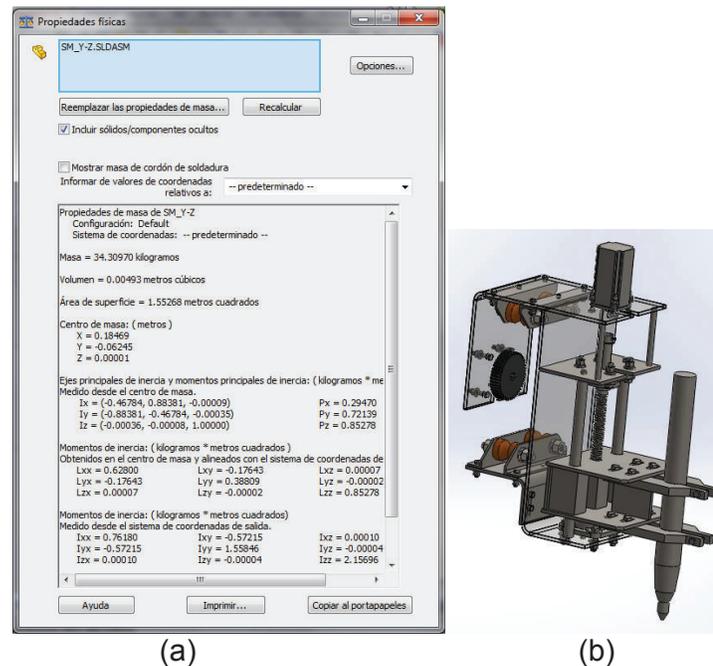
Figura 3.7. Diámetro de paso rueda dentada eje Y.
Numero de dientes 47, paso diametral 14, ángulo de presión 14.5°.

Tabla 3.3. Cálculo de velocidades aceleraciones y tiempo para el eje Y.

Datos		Ecuación		Resultado
Desplazamiento lineal	$X_1 = 100 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_1 = \frac{2X_1}{dp}$	$\theta_1 = 2.35 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \text{ mm}$			
Velocidad lineal	$v = 130 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Velocidad angular	$\omega_1 = \frac{v}{dp} = \frac{v}{rp}$	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \text{ mm}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Aceleración angular	$\alpha_1 = \frac{(\omega_1)^2}{2\theta_1}$	$\alpha_1 = 1.97 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
Desplazamiento angular	$\theta_1 = 2.35 \text{ rad}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Tiempo	$t_1 = \frac{\omega_1}{\alpha_1}$	$t_1 = 1.55 \text{ s}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 1.97 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			
Desplazamiento lineal	$X_2 = 1360 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_2 = \frac{2X_2}{dp}$	$\theta_2 = 31.9 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \text{ mm}$			
Desplazamiento angular	$\theta_2 = 31.9 \text{ rad}$	Tiempo	$t_2 = \frac{\theta_2}{\omega_1}$	$t_2 = 10.46 \text{ s}$
Velocidad angular	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$			
Desplazamiento lineal	$X_3 = 100 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_3 = \frac{2X_3}{dp}$	$\theta_3 = 2.35 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \text{ mm}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Desaceleración angular	$\alpha_3 = \frac{-(\omega_1)^2}{2\theta_1}$	$\alpha_3 = -1.97 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
Desplazamiento angular	$\theta_3 = 2.35 \text{ rad}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Tiempo	$t_3 = \frac{-\omega_1}{\alpha_1}$	$t_3 = 1.55 \text{ s}$
Aceleración angular	$\alpha_3 = -1.97 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			

- **Cálculo de torques inerciales y no inerciales**

El dato de la inercia se obtiene del modelo tridimensional de los elementos que constan en el movimiento de este eje. Los datos de masa e inercia del mecanismo Y-Z se muestran en la figura 3.8. Los resultados del cálculo de torques y selección del motor se muestran en la tabla 3.4.



(a) Datos numéricos, (b) Modelo tridimensional.
 Figura 3.8. Datos mecanismos Z-Y.

Tabla 3.4. Cálculo de torques y selección del motor del eje Y.

Datos		Ecuación		Resultado
Masa del mecanismo	$m_Y = 34.3 \text{ kg}$	Inercia por la masa en movimiento	$I_m = \frac{m_Y}{e} \left(\frac{dp}{2} \right)^2$ (50 pág. 129)	$I_m = 0.07 \text{ kg m}^2$
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Factor de eficiencia	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Inercia del mecanismo Y	$I_Y = 0.762 \text{ kg m}^2$	Inercia total	$I_T = I_Y + I_m$	$I_T = 0.832 \text{ kg m}^2$
Inercia de la masa	$I_m = 0.07 \text{ kg m}^2$			
Inercia total	$I_T = 0.832 \text{ kg m}^2$	Torque por aceleración	$T_1 = I_T \times \alpha_1$ (50 pág. 98)	$T_1 = 1.64 \text{ Nm}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 1.97 \text{ rad/s}^2$			
Masa del mecanismo	$m_Y = 34.3 \text{ kg}$	Fuerza de fricción	$F_f = m_Y * f$	$F_f = 0.343 \text{ kg}$
Coefficiente de fricción	$f = 0.01$ (48 pág. 88)			
Fuerza de fricción	$F_f = 0.343 \text{ kg}$	Torque por fuerzas de fricción o torque constante	$T_f = \frac{F_f * rp}{e} \times 9.8$ (50 pág. 130)	$T_f = 0.16 \text{ Nm}$
Eficiencia del mecanismo	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Radio de paso	$rp = 42.635 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Torque por aceleración	$T_1 = 1.64 \text{ Nm}$	Torque total	$T_A = T_1 + T_K$ (50 pág. 97)	$T_A = 1.81 \text{ Nm}$
Torque constante	$T_f = 0.16 \text{ Nm}$			

Tabla 3.4. Cálculo de torques y selección del motor del eje Y, continuación.

Preselección del motor LONGS 34HS5435C $T_p = 11.3 \text{ N m}$, $m_M = 5 \text{ kg}$, $I_R = 3.6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$; recalculando:				
Datos		Ecuación		Resultado
Masa del mecanismo	$m_Y = 34.3 \text{ kg}$	Inercia por la masa en movimiento	$I_m = \frac{m_Z + m_M}{e} \left(\frac{dp}{2} \right)^2$ (50 pág. 129)	$I_m = 0.08 \text{ kg m}^2$
Masa del motor	$m_M = 5 \text{ kg}$			
Diámetro de paso	$dp = 85.27 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Factor de eficiencia	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Inercia del mecanismo Y	$I_Y = 0.762 \text{ kg m}^2$	Inercia total	$I_T = I_Y + I_m$	$I_T = 0.842 \text{ kg m}^2$
Inercia de la masa	$I_m = 0.08 \text{ kg m}^2$			
Inercia total	$I_T = 0.842 \text{ kg m}^2$	Torque por aceleración	$T_1 = I_T \times \alpha_1$ (50 pág. 98)	$T_1 = 1.66 \text{ N m}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 1.97 \text{ rad/s}^2$			
Masa del mecanismo	$m_Y = 34.3 \text{ kg}$	Fuerza de fricción	$Ff = (m_Y + m_M) f$	$F_f = 0.393 \text{ N m}$
Masa del motor	$m_M = 5 \text{ kg}$			
Coefficiente de fricción	$f = 0.01$ (48 pág. 88)			
Fuerza de fricción	$F_f = 0.393 \text{ N m}$	Torque por fuerzas de fricción o torque constante	$T_f = \frac{Ff * rp}{e} \times 9.8$ (50 pág. 130)	$T_f = 0.182 \text{ N m}$
Eficiencia del mecanismo	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Radio de paso	$rp = 42.635 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Inercia del rotor	$I_R = 3.6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$	Torque del rotor	$T_R = I_R \times \alpha_1$	$T_R = 7.1 \times 10^{-4} \text{ N m}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 1.97 \text{ rad/s}^2$			
Torque del rotor	$T_R = 7.1 \times 10^{-4} \text{ N m}$	Torque constante	$T_K = T_f + T_R = T_B$	$T_K = 0.183 \text{ N m}$
Torque por fricción	$T_f = 0.182 \text{ N m}$			
Torque constante	$T_K = 0.183 \text{ N m}$	Torque total	$T_A = T_1 + T_K$ (50 pág. 97)	$T_A = 1.843 \text{ N m}$
Torque por aceleración	$T_1 = 1.66 \text{ N m}$			
CÁLCULO DE TORQUE DE SALIDA DEL MOTOR LONGS 34HS5435C				
Precisión de posicionamiento máxima	$Ap_{\max} \leq 0.2 \text{ mm}$ Especificaciones técnicas	Precisión de posicionamiento para el eje Y	$Ap = \frac{n p}{R}$	$Ap = 0.054$ $Ap \leq 0.2 \text{ mm} \Rightarrow ok$
Resolución del controlador	$R = 5000 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			
Numero de dientes de la rueda eje Y	$n = 47$			
Paso de la rueda eje Y	$p = 5.7 \text{ mm}$ (37 pág. 328)			
Resolución del controlador	$R = 5000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}}$	Frecuencia de pulsos	$f_P = R \omega$	$f_P = 2427 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$
Velocidad angular	$\omega = 3.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0.485 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$			
Frecuencia de pulsos	$f_P = 2427 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$	Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fP} = \frac{\pi f_P}{2}$ (49 pág. 62)	$\omega_{fP} = 3812 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Tensión de funcionamiento	$V_{DC} = 60 \text{ V}$	Componente fundamental de voltaje, con das faces encendidas	$V = \frac{4 V_{DC}}{\pi}$ (49 pág. 64)	$V = 76.4 \text{ V}$
Torque pico	$T_p = 11.3 \text{ N m}$	Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 1.4 \frac{2\sqrt{2} T_p}{\pi}$ (49 pág. 70)	$T_{PB} = 14.24 \text{ N m}$

Tabla 3.4. Cálculo de torques y selección del motor del eje Y, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Resistencia de fase	$R = 1.9 \Omega$ Dato motor	Flujo magnético	$\Psi_M = \frac{T_{PB} R}{pV}$ (49 pág. 70)	$\Psi_M = 0.007 \text{ Wbt}$
Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 14.24 \text{ Nm}$			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Componente fundamental de voltaje	$V = 76.4 \text{ V}$			
Resistencia de fase	$R = 1.9 \Omega$ Dato motor	Torque de salida a $R = 5000 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$	$T_S = \frac{p\Psi_M V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{\frac{1}{2}}}$ $-\frac{p\omega\Psi_M^2 R}{(R^2 + \omega^2 L^2)}$ (49 pág. 66)	$T_S = 0.34 \text{ Nm}$
Inductancia	$I = 0.02 \text{ H}$ Dato motor			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Flujo magnético	$\Psi_M = 0.0186 \text{ Wbt}$			
Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fp} = 3812 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$			
Componente fundamental de voltaje	$V = 76.4 \text{ V}$	$T_P = 11.3 \text{ Nm} > T_A = 1.843 \text{ Nm} \Rightarrow \text{Si}$ $T_S = 0.34 \text{ Nm} > T_K = 0.183 \text{ Nm} \Rightarrow \text{Si}$		
Selección del motor 34HS5435C-37B2				

- **Cálculo de reacciones**

Las cargas dinámicas y estáticas, producen reacciones en las ruedas de las guías. Para evaluar estas reacciones se define el diagrama de cuerpo libre para el mecanismo del eje Y, el cual es mostrado en la figura 3.9. Los orígenes del ensamble de la figura 3.9, se localizan en el centro de masa de la rueda dentada, puesto que es el centro de giro para el movimiento. A partir de este origen se localiza el centro de masa del mecanismo, cuyas coordenadas son: $x = 149 \text{ mm}$; $y = 0 \text{ mm}$; $z = -55 \text{ mm}$. En la tabla 3.5, se dan los resultados de cálculo de fuerzas dinámicas y en la tabla 3.6, se indican los resultados de cálculo de reacciones.

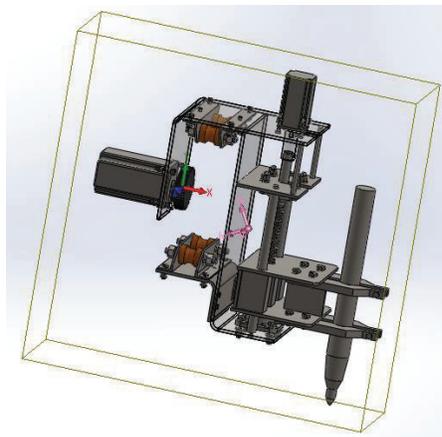


Figura 3.9. Mecanismos eje Y - Z.

Tabla 3.5. Resultados de cálculo de fuerzas dinámicas.

Datos		Ecuación		Resultado
Desplazamiento lineal	$X_1 = 0.1m$	Aceleración	$a = \frac{v^2}{2X_1}$	$a = 0.0845 \frac{m}{s^2}$
Velocidad lineal	$V = 0.13 \frac{m}{s}$			
Masa del mecanismo	$m_y = 39.3 kg$	Fuerza dinámica por el movimiento de la masa	$\sum F_z = m a$	$F_z = 3.32 N$
Aceleración	$a = 0.0845 \frac{m}{s^2}$			
Torque máximo	$T_T = 1.843 Nm$	Fuerza tangencial	$F_{t_1} = \frac{T_T}{rp}$	$F_{t_1} = 43.23 N$
Diámetro de paso	$rp = 42.635 \times 10^{-3} m$			
Velocidad lineal	$V = 0.13 \frac{m}{s} = 7.8 \frac{m}{min}$	Fuerza tangencial final	$F_t = \frac{27.6 + Vn^2}{27.6} F_{t_1}$ (46 pág. 484)	$F_t = 47.6 N$
Fuerza tangencial final	$F_t = 47.6 N$	Fuerza radial	$Fr = F_t \tan 14.5^\circ$	$Fr = 12.3 N$

Las fuerzas ocasionadas por el movimiento de la rueda dentada (F_t y F_r), serán aplicadas en las coordenadas: $x = 0$ mm; $y = 0$ mm; $z = 43$ mm, mostrado en la figura 3.10. En la tabla 3.6, se indican las reacciones para el caso estático y dinámico.

Tabla 3.6. Cálculo de reacciones del mecanismo de los ejes Y-Z.

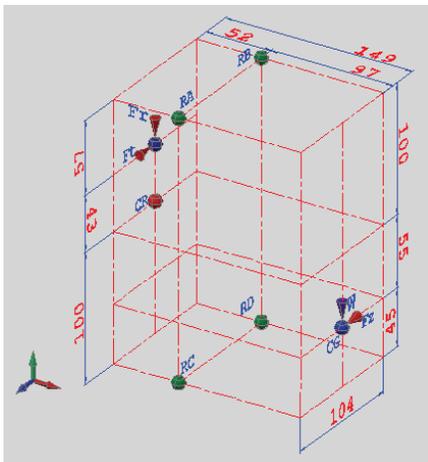
Fuerza	Diagrama
	 <p>Figura 3.10. Diagrama de cuerpo libre para los soportes de mecanismos Y- Z. CR: Centro de rotación; CG: Centro de masa del mecanismo; Fr: Fuerza radial (12.3 N); Ft: Fuerza tangencial (47.6 N); W: Peso (385 N); Fz: Fuerza por la masa en movimiento (3.32 N); RA, RB, RC, RD: Reacciones en los apoyos. Nota: Eje X, Eje Y, Eje Z.</p>
Carga estática	<p>Reacción eje X</p> $RA = RB = -\frac{385 * 97}{2 * 200} = -93.4 N$ $RC = RD = -\frac{385 * 97}{2 * 200} = 93.4 N$ <p>Reacción eje Z</p> $RA = RB = \frac{385}{2} = 192.5 N$ $RB = RC = 0 N$

Tabla 3.6. Cálculo de reacciones del mecanismo de los ejes Y-Z, continuación.

Aceleración de masa	<p style="text-align: center;">Reacciones X</p> $RA = \frac{3.32 * 97}{2 * 104} = 1.55 \text{ N}$ $RB = -\frac{3.32 * 97}{2 * 104} = -1.55 \text{ N}$ $RC = \frac{3.32 * 97}{2 * 104} = 1.55 \text{ N}$ $RD = -\frac{3.32 * 97}{2 * 104} = -1.55 \text{ N}$	<p style="text-align: center;">Reacciones Z</p> $RA = -\frac{3.32 * 155}{2 * 200} = -1.28 \text{ N}$ $RB = \frac{3.32 * 155}{2 * 200} = 1.28 \text{ N}$ $RC = -\frac{3.32 * 45}{2 * 200} = -0.37 \text{ N}$ $RD = \frac{3.32 * 45}{2 * 200} = 0.37 \text{ N}$																																																																						
Fuerza tangencial por el movimiento del piñón	<p style="text-align: center;">Reacciones X</p> $RA = RC = \frac{47.6 * 52}{2 * 104} = 11.9 \text{ N}$ $RB = RD = -\frac{47.6 * 52}{2 * 104} = -11.9 \text{ N}$	<p style="text-align: center;">Reacciones Z</p> $RA = -\frac{47.6 * 57}{2 * 200} = -6.8 \text{ N}$ $RB = \frac{47.6 * 57}{2 * 200} = 6.8 \text{ N}$ $RC = -\frac{47.6 * 143}{2 * 200} = -17 \text{ N}$ $RD = \frac{47.6 * 143}{2 * 200} = 17 \text{ N}$																																																																						
Fuerza radial por el movimiento del piñón	<p style="text-align: center;">Reacciones en X</p> $RA = RB = \frac{12.3 * 52}{2 * 200} = 1.6 \text{ N}$ $RC = RD = -\frac{12.3 * 52}{2 * 200} = -1.6 \text{ N}$	<p style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = RB = \frac{12.3 * 52}{104} = 6.15 \text{ N}$ $RC = RD = 0$																																																																						
Fuerzas de rozamiento	$FY = \frac{385 * 0.01}{4} = 0.96 \text{ N}$																																																																							
Fuerzas equivalentes	<p style="text-align: center;">Reacciones en dirección X</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Reaciones</th> <th>RA</th> <th>RB</th> <th>RC</th> <th>RD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceleración de la masa</td> <td>1.55</td> <td>-1.55</td> <td>1.55</td> <td>-1.55</td> </tr> <tr> <td>Fuerza tangencial</td> <td>11.9</td> <td>-11.9</td> <td>11.9</td> <td>-11.9</td> </tr> <tr> <td>Fuerza radial</td> <td>1.6</td> <td>1.6</td> <td>-1.6</td> <td>-1.6</td> </tr> <tr> <td>Sumatoria</td> <td>15.05</td> <td>-11.85</td> <td>11.85</td> <td>-15.05</td> </tr> <tr> <td>Estáticas</td> <td>-93.4</td> <td>-93.4</td> <td>93.4</td> <td>93.4</td> </tr> <tr> <td>Equivalent es</td> <td>-78.35</td> <td>-105.25</td> <td>105.25</td> <td>78.35</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Reacciones en dirección Z</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Reaciones</th> <th>RA</th> <th>RB</th> <th>RC</th> <th>RD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceleración de la masa</td> <td>-1.28</td> <td>1.28</td> <td>-0.37</td> <td>0.37</td> </tr> <tr> <td>Fuerza tangencial</td> <td>-6.8</td> <td>6.8</td> <td>-17</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>Fuerza radial</td> <td>6.15</td> <td>6.15</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Sumatoria</td> <td>-1.93</td> <td>14.23</td> <td>-17.37</td> <td>17.37</td> </tr> <tr> <td>Estáticas</td> <td>192.5</td> <td>192.5</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Equivalent es</td> <td>190.57</td> <td>206.73</td> <td>-17.37</td> <td>17.37</td> </tr> </tbody> </table>		Reaciones	RA	RB	RC	RD	Aceleración de la masa	1.55	-1.55	1.55	-1.55	Fuerza tangencial	11.9	-11.9	11.9	-11.9	Fuerza radial	1.6	1.6	-1.6	-1.6	Sumatoria	15.05	-11.85	11.85	-15.05	Estáticas	-93.4	-93.4	93.4	93.4	Equivalent es	-78.35	-105.25	105.25	78.35	Reaciones	RA	RB	RC	RD	Aceleración de la masa	-1.28	1.28	-0.37	0.37	Fuerza tangencial	-6.8	6.8	-17	17	Fuerza radial	6.15	6.15	0	0	Sumatoria	-1.93	14.23	-17.37	17.37	Estáticas	192.5	192.5	0	0	Equivalent es	190.57	206.73	-17.37	17.37
Reaciones	RA	RB	RC	RD																																																																				
Aceleración de la masa	1.55	-1.55	1.55	-1.55																																																																				
Fuerza tangencial	11.9	-11.9	11.9	-11.9																																																																				
Fuerza radial	1.6	1.6	-1.6	-1.6																																																																				
Sumatoria	15.05	-11.85	11.85	-15.05																																																																				
Estáticas	-93.4	-93.4	93.4	93.4																																																																				
Equivalent es	-78.35	-105.25	105.25	78.35																																																																				
Reaciones	RA	RB	RC	RD																																																																				
Aceleración de la masa	-1.28	1.28	-0.37	0.37																																																																				
Fuerza tangencial	-6.8	6.8	-17	17																																																																				
Fuerza radial	6.15	6.15	0	0																																																																				
Sumatoria	-1.93	14.23	-17.37	17.37																																																																				
Estáticas	192.5	192.5	0	0																																																																				
Equivalent es	190.57	206.73	-17.37	17.37																																																																				

3.2.2.2. Análisis de esfuerzos en las guías

Son elementos de diámetro 1 pulgada y longitud 1760 mm, las cuales están sujetas al viga por medio de tornillos cabeza Allen, donde se aplican los soportes o restricciones, las fuerzas de reacción resultantes, se aplican en las áreas donde mantiene el contacto con los patines. El ancho del mecanismo es 200 mm y el

centro de movimiento se encuentra en la mitad; la carga máxima se localiza a 100 mm luego de iniciado el movimiento; según la figura 3.1, por lo tanto la distancia crítica se encuentra a 200 mm del extremo. En las figuras 3.11 a 3.13, se indican los resultados del análisis para las guías.

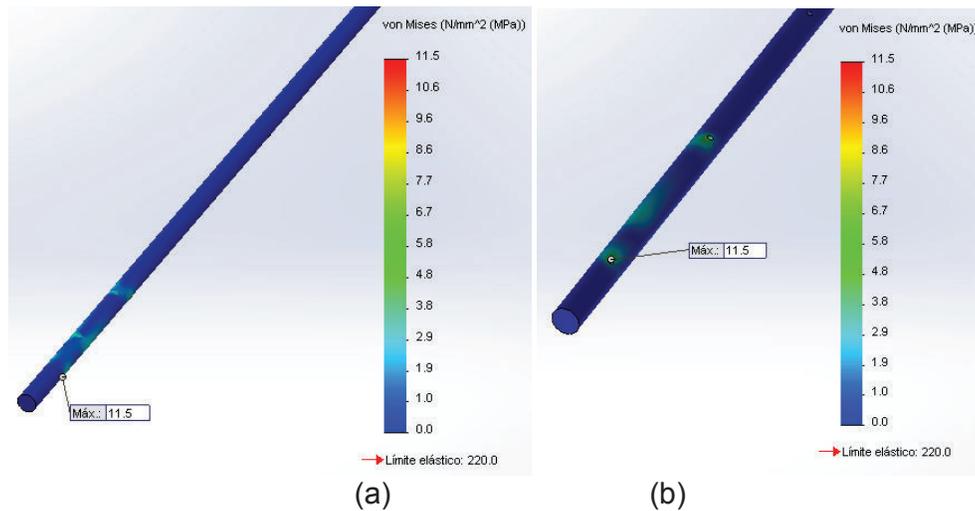


Figura 3.11. Esfuerzo de Von Mises para las guías del eje Y.
(a) Vista general, (b) Acercamiento a la zona crítica.

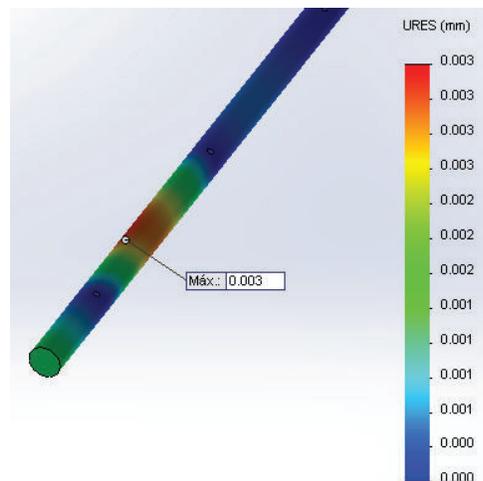


Figura 3.12. Desplazamiento máximo para las guías del eje Y.

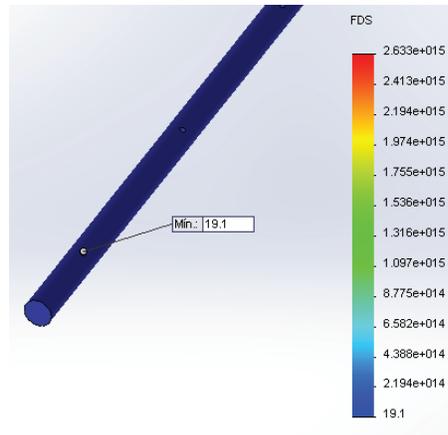


Figura 3.13. Factor de seguridad mínimo para las guías del eje Y.

3.2.2.3. Análisis de esfuerzos en la cremallera

Este elemento posee varios dientes de paso diametral 14 y ángulo de presión de 14.5° . Se ha dividido en cuatro módulos por facilidad de construcción y montaje, los cuales están sujetos con tornillo cabeza Allen. De acuerdo al criterio aplicado a las guías, la fuerza crítica se encuentra aproximadamente a 130 mm de uno de sus extremos, de acuerdo al patrón de funcionamiento de la figura 3.1. Los resultados del análisis se presentan en las figuras 3.14 a 3.16.

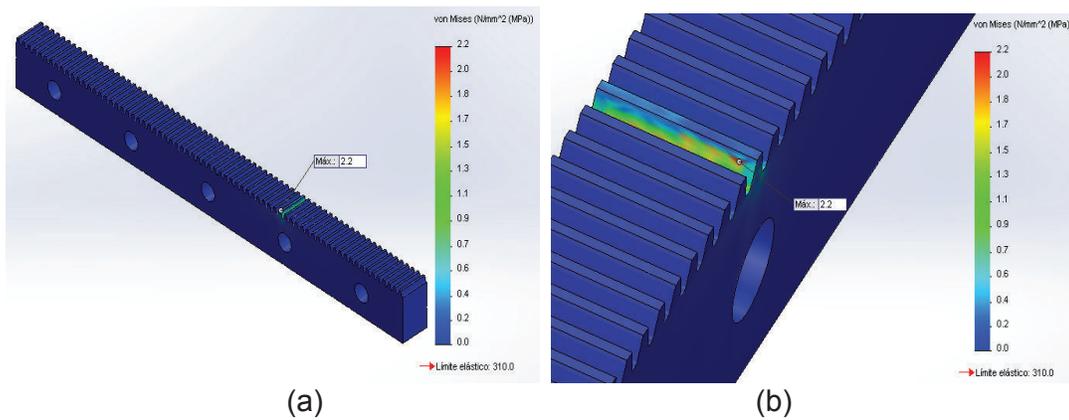


Figura 3.14. Esfuerzo de Von Mises para las cremalleras del eje Y.
(a) Vista general, (b) Acercamiento a la zona crítica.

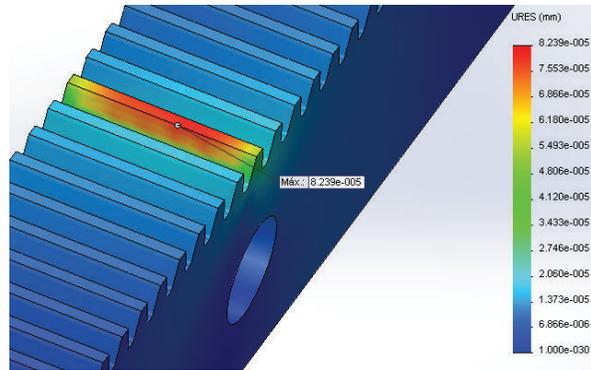


Figura 3.15. Desplazamiento máximo para las cremalleras del eje Y.

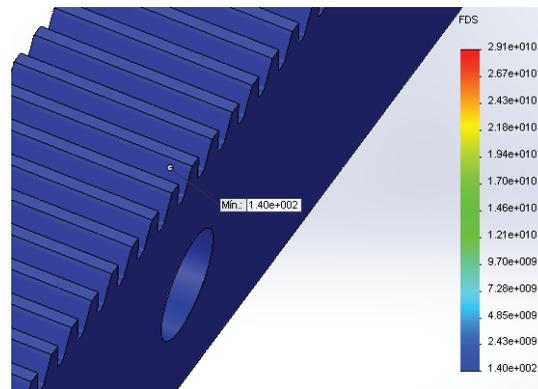


Figura 3.16. Factor de seguridad mínimo para las cremalleras del eje Y.

3.2.2.4. Análisis de esfuerzos en la rueda dentada

Posee un ancho de cara aproximado de 20 mm ($\frac{3}{4}$ "), 47 dientes y ángulo de presión de 14.5° . Las fuerzas son las mismas aplicadas a la cremallera, los resultados del análisis en este elemento en las figuras 3.17 a 3.19.

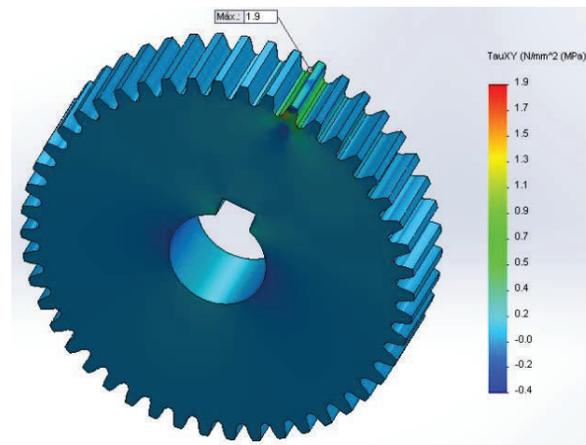


Figura 3.17. Esfuerzo cortante máximo en la rueda dentada del eje Y.

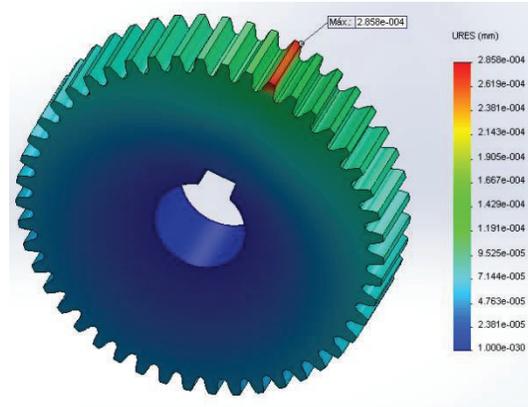


Figura 3.18. Desplazamiento máximo en la rueda dentada del eje Y.

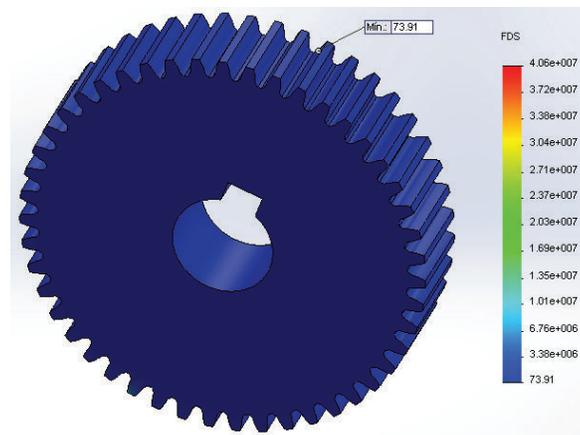


Figura 3.19. Factor de seguridad mínimo en la rueda dentada del eje Y.

3.2.3. Diseño de elementos de movimiento en el eje X

Traslada las estructuras soporte, tanto del mecanismo de los ejes X-Y y Z. La transmisión de movimiento en es por medio de rueda y cremallera; guiado por barras redondas como se muestra en la figura 3.20. El peso total de esta partes de es de 168.11 kg, incluye todos los elementos del eje X - Y y Z, peso de la antorcha, no incluye el peso del motor. El material definido para los elementos 1, 2, 3 y 4, según la figura 3.20, es el siguiente:

- Rueda dentada, paso diametral 10, ángulo de presión 14.5°, número de dientes 51 (1).- Hierro gris ASTM 40, límite de compresión 965 MPa, límite de tensión 293 MPa.
- Cremallera, paso diametral 10, ángulo de presión 14.5° (2).- Acero AISI 1045, resistencia última 565 MPa, resistencia a la fluencia 310 MPa.

- Guías redondas $\Phi 1"$, longitud 3560 mm, (3).- Acero AISI 1018, resistencia última 400 MPa, resistencia a la fluencia 220 MPa.
- Ruedas de guías (4).- Bronce SAE 65, resistencia última 305 MPa, resistencia a la fluencia 150 MPa.

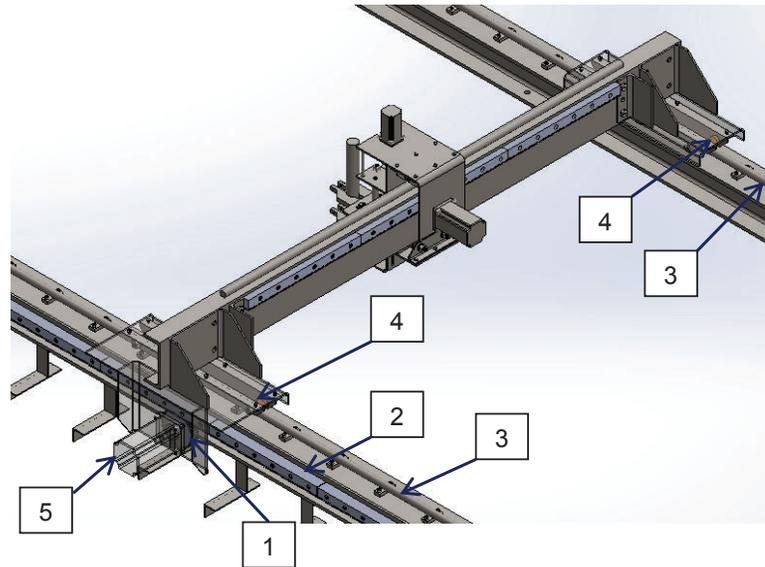


Figura 3.20. Elementos mecánicos para movimiento en el eje X.
1: rueda dentada, 2: cremalleras, 3: guías redondas, 4: ruedas de guía,
5: motor.

- ***Cálculo de velocidades, aceleraciones y tiempo***

La longitud neta de traslación para el eje X: 2950 mm, distancia para acelerar y desacelerar: $X_1 = X_3 = 200$ mm, velocidad máxima de trabajo 130 mm/s. Para el cálculo de velocidades y aceleraciones, es necesario conocer el diámetro de paso de la rueda dentada del eje X, este valor es indicado en la figura 3.21. En la tabla 3.7, se muestran los resultados de análisis de movimiento.

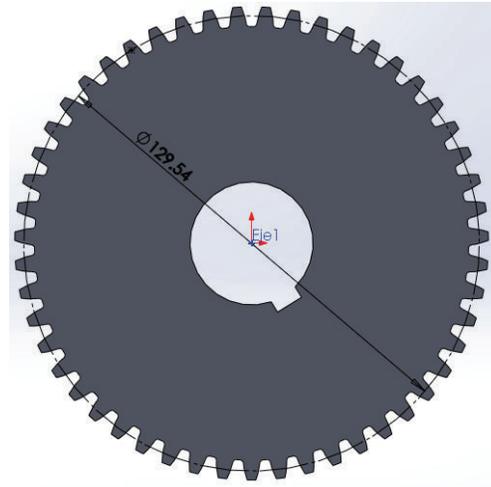


Figura 3.21. Diámetro de paso rueda dentada eje X.
Numero de dientes 51, paso diametral 10, ángulo de presión 14.5°.

Tabla 3.7. Cálculo de velocidades, aceleraciones y tiempo.

Datos		Ecuación		Resultado
Desplazamiento lineal	$X_1 = 200 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_1 = \frac{2X_1}{dp}$	$\theta_1 = 3.09 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Velocidad lineal	$v = 130 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Velocidad angular	$\omega_1 = \frac{v}{\frac{dp}{2}} = \frac{v}{rp}$	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Aceleración angular	$\alpha_1 = \frac{(\omega_1)^2}{2\theta_1}$	$\alpha_1 = 0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
Desplazamiento angular	$\theta_1 = 3.09 \text{ rad}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Tiempo	$t_1 = \frac{\omega_1}{\alpha_1}$	$t_1 = 3.09 \text{ s}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			
Desplazamiento lineal	$X_2 = 2560 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_2 = \frac{2X_2}{dp}$	$\theta_2 = 39.52 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Desplazamiento angular	$\theta_2 = 39.52 \text{ rad}$	Tiempo	$t_2 = \frac{\theta_2}{\omega_1}$	$t_2 = 19.76 \text{ s}$
Velocidad angular	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$			
Desplazamiento lineal	$X_3 = 200 \text{ mm}$	Desplazamiento angular	$\theta_3 = \frac{2X_3}{dp}$	$\theta_3 = 3.09 \text{ rad}$
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Desaceleración angular	$\alpha_3 = \frac{-(\omega_1)^2}{2\theta_1}$	$\alpha_3 = -0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
Desplazamiento angular	$\theta_3 = 3.09 \text{ rad}$			
Velocidad angular	$\omega_1 = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Tiempo	$t_3 = \frac{-\omega_1}{\alpha_1}$	$t_3 = 3.09 \text{ s}$
Aceleración angular	$\alpha_3 = -0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			

- *Cálculo de torques inerciales y no inerciales*

El valor de la inercia es obtenido del modelo tridimensional de los elementos que constan en el movimiento de este eje. Los datos de masa e inercia de los mecanismos X-Y-Z, se muestran en las figuras 3.22 y 3.23. Los resultados del cálculo de torques y selección del motor se muestran en la tabla 3.8.

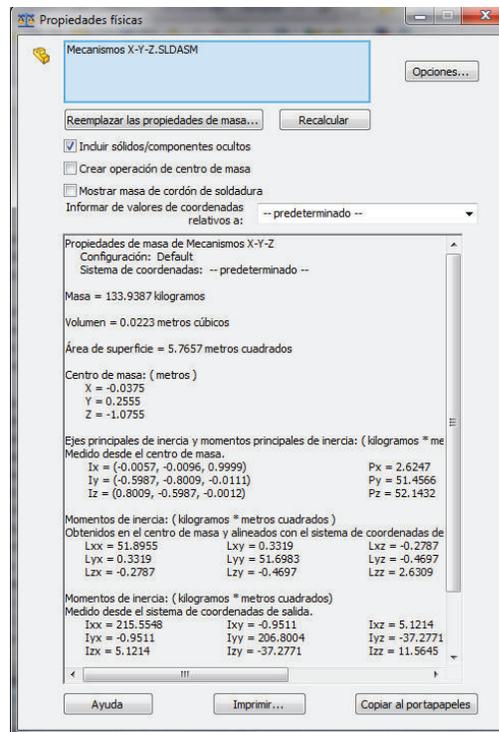


Figura 3.22. Datos de los mecanismos X-Y-Z, datos numéricos.

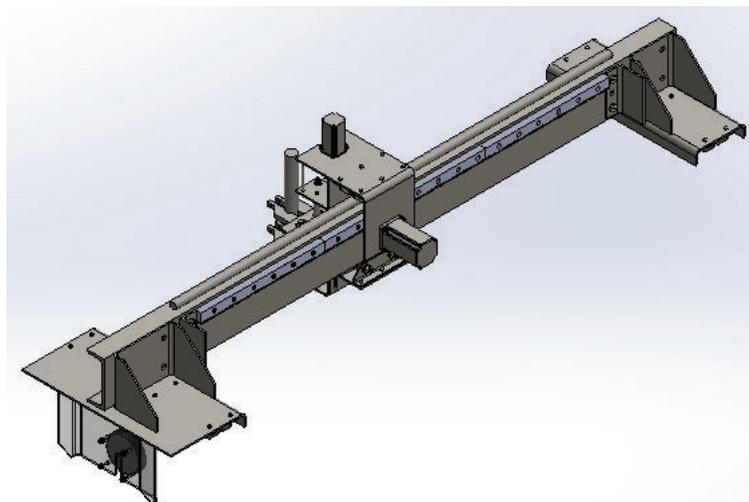


Figura 3.23. Datos de los mecanismos X-Y-Z, modelo tridimensional.

Tabla 3.8. Cálculo de torques y selección del motor eje X.

Datos		Ecuación		Resultado
Masa del mecanismo	$m_x = 133.94 \text{ kg}$	Inercia por la masa en movimiento	$I_m = \frac{m_z}{e} \left(\frac{dp}{2} \right)^2$ (50 pág. 129)	$I_m = 0.624 \text{ kg m}^2$
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Factor de eficiencia	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Inercia del mecanismo X	$I_x = 11.56 \text{ kg m}^2$	Inercia total	$I_T = I_x + I_m$	$I_T = 12.18 \text{ kg m}^2$
Inercia de la masa	$I_m = 0.624 \text{ kg m}^2$			
Inercia total	$I_T = 12.18 \text{ kg m}^2$	Torque por aceleración	$T_1 = I_T \times \sigma_1$ (50 pág. 98)	$T_1 = 7.88 \text{ Nm}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			
Masa del mecanismo	$m_x = 133.94 \text{ kg}$	Fuerza de fricción	$F_f = m_y * f$	$F_f = 1.34 \text{ kg}$
Coefficiente de fricción	$f = 0.01$ (48 pág. 88)			
Fuerza de fricción	$F_f = 1.34 \text{ kg}$	Torque por fuerzas de fricción o torque constante	$T_f = \frac{F_f * rp}{e} \times 9.8$ (50 pág. 130)	$T_f = 0.945 \text{ Nm}$
Eficiencia del mecanismo	$e = 0.9$ (50 pág. 129)			
Radio de paso	$rp = 64.77 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Torque por aceleración	$T_1 = 7.88 \text{ Nm}$	Torque total	$T_K = T_f$ $T_A = T_1 + T_K$ (50 pág. 97)	$T_K = 8.83 \text{ Nm}$
Torque constante	$T_f = 0.945 \text{ Nm}$			
Preselección del motor LONGS 42HS6480 $T_p = 29.4 \text{ Nm}$, $m_M = 11.7 \text{ kg}$, $I_R = 1.6 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$; recalculando:				
Masa del mecanismo	$m_x = 133.94 \text{ kg}$	Inercia por la masa en movimiento	$I_m = \frac{m_z + m_M}{e} \left(\frac{dp}{2} \right)^2$ (50 pág. 129)	$I_m = 0.678 \text{ kg m}^2$
Masa del motor	$m_M = 11.7 \text{ kg}$			
Diámetro de paso	$dp = 129.54 \text{ mm}$			
Factor de eficiencia	$e = 0.9$ (50 pág. 154)	Inercia total	$I_T = I_{ZZ} + I_m$	$I_T = 12.24 \text{ kg m}^2$
Inercia del mecanismo X	$I_x = 11.56 \text{ kg m}^2$			
Inercia de la masa	$I_m = 0.678 \text{ kg m}^2$			

Tabla 3.8. Cálculo de torques y selección del motor eje X, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Inercia total	$I_T = 12.24 \text{ kg m}^2$	Torque por aceleración	$T_1 = I_T \cdot \alpha_1$ (50 pág. 98)	$T_1 = 7.92 \text{ Nm}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			
Masa del mecanismo	$m_X = 133.94 \text{ kg}$	Fuerza de fricción	$F_f = (m_Z + m_M) \cdot f$	$F_f = 1.46 \text{ kg}$
Masa del motor	$m_M = 11.7 \text{ kg}$			
Coefficiente de fricción	$f = 0.01$ (48 pág. 88)			
Fuerza de fricción	$F_f = 1.46 \text{ kg}$	Torque por fuerzas de fricción o torque constante	$T_f = \frac{F_f \cdot r_p}{e} \cdot 9.8$ (50 pág. 130)	$T_f = 1.03 \text{ Nm}$
Eficiencia del mecanismo	$e = 0.9$ (50 pág. 154)			
Radio de paso	$r_p = 64.77 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Inercia del rotor	$I_R = 1.6 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$	Torque del rotor	$T_R = I_R \cdot \alpha_1$	$T_R = 1.035 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Aceleración angular	$\alpha_1 = 0.647 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$			
Torque del rotor	$T_R = 1.035 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	Torque constante	$T_K = T_f + T_R = T_B$	$T_K = 1.031 \text{ Nm}$
Torque por fricción	$T_f = 1.03 \text{ Nm}$			
Torque constante	$T_K = 1.031 \text{ Nm}$			
Torque por aceleración	$T_1 = 7.92 \text{ Nm}$		$T_A = T_1 + T_K$ (50 pág. 97)	$T_A = 8.951 \text{ Nm}$
CÁLCULO DE TORQUE DE SALIDA DEL MOTOR LONGS 42HS6480				
Datos		Ecuación		Resultado
Precisión de posicionamiento máxima	$Ap_{\max} \leq 0.2 \text{ mm}$ Especificaciones técnicas	Precisión de posicionamiento para el eje Y	$Ap = \frac{n \cdot p}{R}$	$Ap = 0.1$ $Ap \leq 0.2 \text{ mm} \Rightarrow \text{ok}$
Resolución del controlador	$R = 4000 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			
Numero de dientes de la rueda eje Y	$n = 51$			
Paso de la rueda eje Y	$p = 7.979 \text{ mm}$ (37 pág. 328)			
Resolución del controlador	$R = 4000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}}$	Frecuencia de pulsos	$f_p = R \cdot \omega$	$f_p = 1273 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$
Velocidad angular	$\omega = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0.318 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$			
Frecuencia de pulsos	$f_p = 1273 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}}$	Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fp} = \frac{\pi \cdot f_p}{2}$ (49 pág. 62)	$\omega_{fp} = 2000 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Tensión de funcionamiento	$V_{DC} = 60 \text{ V}$	Componente fundamental de voltaje, con das faces encendidas	$V = \frac{4 V_{DC}}{\pi}$ (49 pág. 64)	$V = 76.4 \text{ V}$
Torque pico	$T_p = 29.4 \text{ Nm}$	Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 1.4 \frac{2\sqrt{2}T_p}{\pi}$ (49 pág. 70)	$T_{PB} = 37 \text{ Nm}$
Resistencia de fase	$R = 0.7 \Omega$ Dato motor	Flujo magnético	$\Psi_M = \frac{T_{PB} R}{pV}$ (49 pág. 70)	$\Psi_M = 0.007 \text{ Wbt}$
Torque de salida a baja velocidad	$T_{PB} = 37 \text{ Nm}$			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Componente fundamental de voltaje	$V = 76.4 \text{ V}$			

Tabla 3.8. Cálculo de torques y selección del motor eje X, continuación.

Resistencia de fase	$R = 0.7 \Omega$ Dato motor	Torque de salida a $R = 4000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}}$	$T_s = \frac{p\Psi_M V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{p\omega\Psi_M^2 R}{(R^2 + \omega^2 L^2)}$ (49 pág. 66)	$T_s = 1.14 \text{ Nm}$
Inductancia	$I = 0.012 \text{ H}$ Dato motor			
Dientes del rotor	$p = 50$ (49 pág. 70)			
Flujo magnético	$\Psi_M = 0.007 \text{ Wbt}$			
Frecuencia angular de pulsos	$\omega_{fp} = 2000 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$			
Componente fundamental de voltaje	$V = 76.4 \text{ V}$			
Selección del motor 34HS5435C-37B2		$T_p = 29.4 \text{ Nm} > T_A = 8.951 \text{ Nm} \Rightarrow \text{Si}$		
		$T_s = 1.14 \text{ Nm} > T_k = 1.031 \text{ Nm} \Rightarrow \text{Si}$		

- **Cálculo de reacciones**

Para evaluar las reacciones se define el diagrama de cuerpo libre para el mecanismo del eje X, el cual es mostrado en la figura 3.24. Los orígenes del ensamble de la figura 3.24, se localizan en el centro de masa de la rueda dentada, puesto que es el centro de giro para el movimiento. A partir de este origen se define el centro de masa del mecanismo total, cuando los mecanismos de movimiento de los ejes Y y Z, están en el extremo izquierdo; es decir, junto al motor del eje X, es el más crítico. Las coordenadas del centro de masa en tales circunstancias son: $x = 35 \text{ mm}$; $y = 793 \text{ mm}$; $z = 235 \text{ mm}$. En la tabla 3.9, se muestran los resultados de análisis de movimiento.

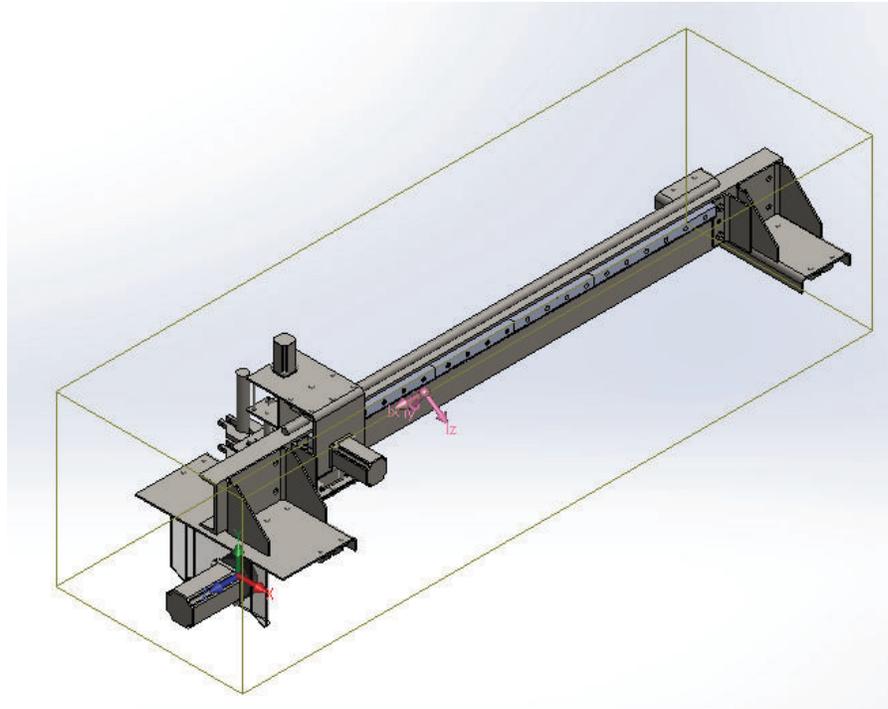


Figura 3.24. Mecanismos ejes X-Y-Z.

Tabla 3.9. Resultados de cálculo de fuerzas dinámicas para el eje X.

Datos		Ecuación		Resultado
Desplazamiento lineal	$X_1 = 0.2 \text{ m}$	Aceleración	$a = \frac{v^2}{2X_1}$	$a = 0.04225 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Velocidad lineal	$V = 0.13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$			
Masa del mecanismo	$m_x = 145.64 \text{ kg}$	Fuerza dinámica por el movimiento de la masa	$\sum F_x = m * a$	$F_x = 6.15 \text{ N}$
Aceleración	$a = 0.04225 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$			
Torque máximo	$T_T = 8.95 \text{ Nm}$	Fuerza tangencial	$F_{t_1} = \frac{T_T}{r_p}$	$F_{t_1} = 138.2 \text{ N}$
Diámetro de paso	$r_p = 64.77 \times 10^{-3} \text{ m}$			
Velocidad lineal	$V = 0.13 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.8 \frac{\text{m}}{\text{min}}$	Fuerza tangencial final	$F_t = \frac{27.6 + Vn^{\frac{1}{2}}}{27.6} F_{t_1}$ (46 pág. 484)	$F_t = 152.2 \text{ N}$
Fuerza tangencial final	$F_t = 406.6 \text{ N}$	Fuerza radial	$Fr = F_t \tan 14.5^\circ$	$Fr = 39.36 \text{ N}$

Las fuerzas ocasionadas por el movimiento de la rueda dentada, serán aplicadas en las coordenadas: $x = 0 \text{ mm}$; $y = 0 \text{ mm}$; $z = 65 \text{ mm}$, mostradas en la figura 3.25. En la tabla 3.10 se indican las reacciones para el caso estático y dinámico, cuando los mecanismos Y-Z, se encuentran en el extremo izquierdo.

Tabla 3.10. Cálculo de reacciones del mecanismo eje X.

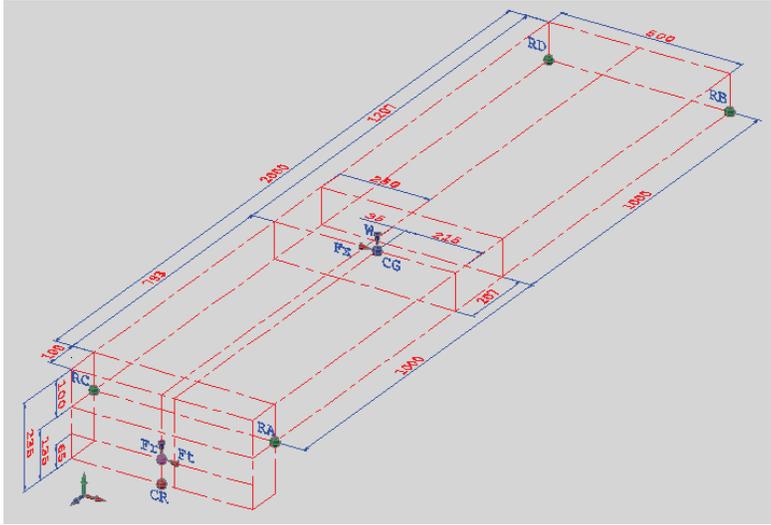
Fuerza	Diagrama		
	 <p data-bbox="532 852 1279 879">Figura 3.25. Diagrama de cuerpo libre para los soportes de mecanismos X - Y - Z.</p> <p data-bbox="435 890 1383 995">CR: Centro de rotación; CG: Centro de masa del mecanismo; Fr: Fuerza radial (39.36N); Ft: Fuerza tangencial (152.2 N); W: Peso (1427.3 N); Fx: Fuerza por la masa en movimiento (6.15 N); RA, RB, RC, RD: Reacciones en los apoyos</p> <p data-bbox="435 1005 691 1031">Nota: Eje X, Eje Y, Eje Z.</p>		
Carga estática	<p data-bbox="818 1037 992 1062" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = \frac{1427.3}{4} + \frac{1427.3 \cdot 35}{2 \cdot 500} + \frac{1427.3 \cdot 207}{2 \cdot 2000} = 480.64 \text{ N}$ $RB = \frac{1427.3}{4} + \frac{1427.3 \cdot 35}{2 \cdot 500} - \frac{1427.3 \cdot 207}{2 \cdot 2000} = 332.92 \text{ N}$ $RC = \frac{1427.3}{4} - \frac{1427.3 \cdot 35}{2 \cdot 500} + \frac{1427.3 \cdot 207}{2 \cdot 2000} = 380.74 \text{ N}$ $RD = \frac{1427.3}{4} - \frac{1427.3 \cdot 35}{2 \cdot 500} - \frac{1427.3 \cdot 207}{2 \cdot 2000} = 233.02 \text{ N}$		
Aceleración de masa	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> <p data-bbox="597 1272 771 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = -1.22 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = 1.86 \text{ N}$ $RC = \frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = 1.22 \text{ N}$ $RD = -\frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = -1.86 \text{ N}$ </td> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> <p data-bbox="1040 1272 1214 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RC = 0$ $RD = 0$ </td> </tr> </table>	<p data-bbox="597 1272 771 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = -1.22 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = 1.86 \text{ N}$ $RC = \frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = 1.22 \text{ N}$ $RD = -\frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = -1.86 \text{ N}$	<p data-bbox="1040 1272 1214 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RC = 0$ $RD = 0$
<p data-bbox="597 1272 771 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = -1.22 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = 1.86 \text{ N}$ $RC = \frac{6.15 \cdot 793}{2 \cdot 2000} = 1.22 \text{ N}$ $RD = -\frac{6.15 \cdot 1207}{2 \cdot 2000} = -1.86 \text{ N}$	<p data-bbox="1040 1272 1214 1297" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RB = \frac{6.15 \cdot 100}{500} = 1.23 \text{ N}$ $RC = 0$ $RD = 0$		
Fuerza tangencial por el movimiento del piñón	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> <p data-bbox="607 1507 781 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{152.2 \cdot 100}{500} = -30.44 \text{ N}$ $RB = 0$ $RC = \frac{152.2 \cdot 100}{500} = 30.44 \text{ N}$ $RD = 0$ </td> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> <p data-bbox="1031 1507 1205 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = RB = \frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = 10.65 \text{ N}$ $RC = RD = -\frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = -10.65 \text{ N}$ </td> </tr> </table>	<p data-bbox="607 1507 781 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{152.2 \cdot 100}{500} = -30.44 \text{ N}$ $RB = 0$ $RC = \frac{152.2 \cdot 100}{500} = 30.44 \text{ N}$ $RD = 0$	<p data-bbox="1031 1507 1205 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = RB = \frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = 10.65 \text{ N}$ $RC = RD = -\frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = -10.65 \text{ N}$
<p data-bbox="607 1507 781 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> $RA = -\frac{152.2 \cdot 100}{500} = -30.44 \text{ N}$ $RB = 0$ $RC = \frac{152.2 \cdot 100}{500} = 30.44 \text{ N}$ $RD = 0$	<p data-bbox="1031 1507 1205 1533" style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> $RA = RB = \frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = 10.65 \text{ N}$ $RC = RD = -\frac{152.2 \cdot 70}{2 \cdot 500} = -10.65 \text{ N}$		

Tabla 3.10. Cálculo de reacciones del mecanismo eje X, continuación.

Fuerza radial por el movimiento del piñón	<p>Reacciones en Y</p> $RA = \frac{39.36 * 100}{2 * 70} = 28.11 \text{ N}$ $RB = 0$ $RC = \frac{39.36 * 100}{2 * 70} = 28.11 \text{ N}$ $RD = 0$	<p>Reacciones en Z</p> $RA = \frac{39.36}{2} = 19.68 \text{ N}$ $RB = 0$ $RC = \frac{39.36}{2} = 19.68 \text{ N}$ $RD = 0$																																																																						
Fuerzas de rozamiento	$Fx = \frac{1427.3 * 0.01}{4} = 3.57 \text{ N}$																																																																							
Fuerzas equivalentes	<p style="text-align: center;">Reacciones en Y</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Reacciones</th> <th>RA</th> <th>RB</th> <th>RC</th> <th>RD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceleración de la masa</td> <td>-1.22</td> <td>1.86</td> <td>1.22</td> <td>-1.86</td> </tr> <tr> <td>Fuerza tangencial</td> <td>-30.44</td> <td>0</td> <td>30.44</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fuerza radial</td> <td>28.11</td> <td>0</td> <td>28.11</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Sumatoria</td> <td>-3.55</td> <td>1.86</td> <td>59.77</td> <td>-1.86</td> </tr> <tr> <td>Estáticas</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Equivalentes</td> <td>-3.55</td> <td>1.86</td> <td>59.77</td> <td>-1.86</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Reacciones en Z</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Reacciones</th> <th>RA</th> <th>RB</th> <th>RC</th> <th>RD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceleración de la masa</td> <td>1.23</td> <td>1.23</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fuerza tangencial</td> <td>10.65</td> <td>10.65</td> <td>-10.65</td> <td>-10.65</td> </tr> <tr> <td>Fuerza radial</td> <td>19.68</td> <td>0</td> <td>19.68</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Sumatoria</td> <td>31.56</td> <td>11.88</td> <td>9.03</td> <td>-10.65</td> </tr> <tr> <td>Estáticas</td> <td>480.64</td> <td>332.92</td> <td>380.74</td> <td>233.02</td> </tr> <tr> <td>Equivalentes</td> <td>512.2</td> <td>344.8</td> <td>389.77</td> <td>222.37</td> </tr> </tbody> </table>		Reacciones	RA	RB	RC	RD	Aceleración de la masa	-1.22	1.86	1.22	-1.86	Fuerza tangencial	-30.44	0	30.44	0	Fuerza radial	28.11	0	28.11	0	Sumatoria	-3.55	1.86	59.77	-1.86	Estáticas	0	0	0	0	Equivalentes	-3.55	1.86	59.77	-1.86	Reacciones	RA	RB	RC	RD	Aceleración de la masa	1.23	1.23	0	0	Fuerza tangencial	10.65	10.65	-10.65	-10.65	Fuerza radial	19.68	0	19.68	0	Sumatoria	31.56	11.88	9.03	-10.65	Estáticas	480.64	332.92	380.74	233.02	Equivalentes	512.2	344.8	389.77	222.37
Reacciones	RA	RB	RC	RD																																																																				
Aceleración de la masa	-1.22	1.86	1.22	-1.86																																																																				
Fuerza tangencial	-30.44	0	30.44	0																																																																				
Fuerza radial	28.11	0	28.11	0																																																																				
Sumatoria	-3.55	1.86	59.77	-1.86																																																																				
Estáticas	0	0	0	0																																																																				
Equivalentes	-3.55	1.86	59.77	-1.86																																																																				
Reacciones	RA	RB	RC	RD																																																																				
Aceleración de la masa	1.23	1.23	0	0																																																																				
Fuerza tangencial	10.65	10.65	-10.65	-10.65																																																																				
Fuerza radial	19.68	0	19.68	0																																																																				
Sumatoria	31.56	11.88	9.03	-10.65																																																																				
Estáticas	480.64	332.92	380.74	233.02																																																																				
Equivalentes	512.2	344.8	389.77	222.37																																																																				

3.2.3.1. Análisis de esfuerzos en las guías

Las guías del eje X, son de diámetro 1 pulgada y 3560 mm de longitud. De igual forma, como las guías del eje Y, las guías del eje X están sujetas al soporte por medio de tornillos cabeza Allen. Donde se aplican los soportes o restricciones de los ejes, se aplican en los puntos donde mantiene el contacto con las ruedas. El ancho del mecanismo es 600 mm y el centro de movimiento se encuentra en la mitad. La carga máxima se localiza a 200 mm luego de iniciado el movimiento; como se indicó en la figura 3.1. Por lo tanto la distancia crítica se encuentra a 500 mm del extremo. En las figuras 3.26 a 3.28, se indican los resultados del análisis para las guías del eje X.

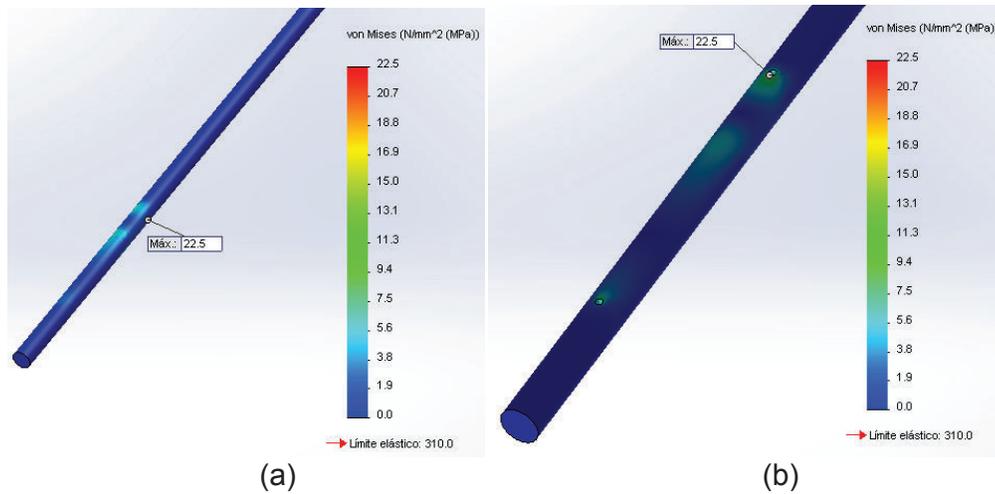


Figura 3.26. Esfuerzo de Von Mises en las guías del eje X.
(a) Vista general, (b) Acercamiento a la zona crítica.

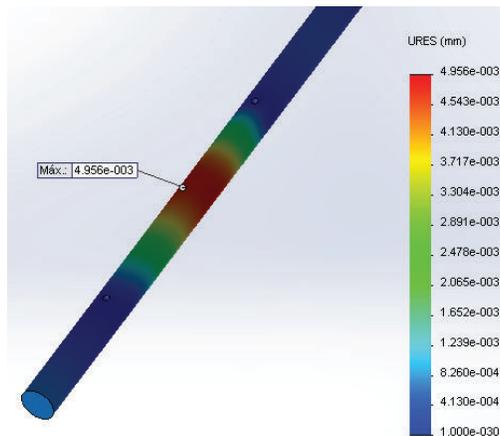


Figura 3.27. Desplazamiento máximo en las guías del eje X.

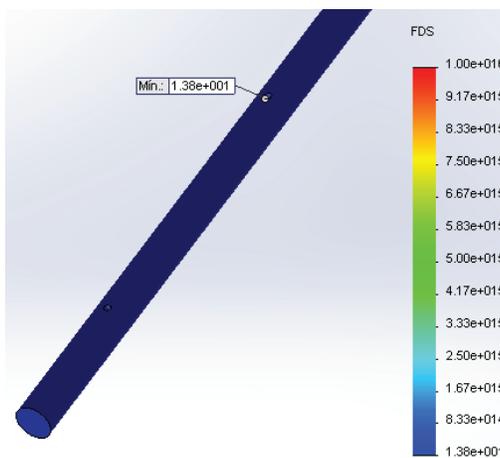


Figura 3.28. Factor de seguridad mínimo en las guías del eje X.

3.2.3.2. Análisis de esfuerzos en la cremallera

La cremallera del eje X, se divide en siete módulos por facilidad de construcción y montaje, están sujetas con tornillo cabeza Allen. Con el mismo criterio aplicado a las guías, la fuerza crítica se encuentra aproximadamente a 440 mm de uno de sus extremos, de acuerdo al patrón de funcionamiento de la figura 3.1. Los resultados del análisis se muestran en las figuras 3.29 a 3.31.

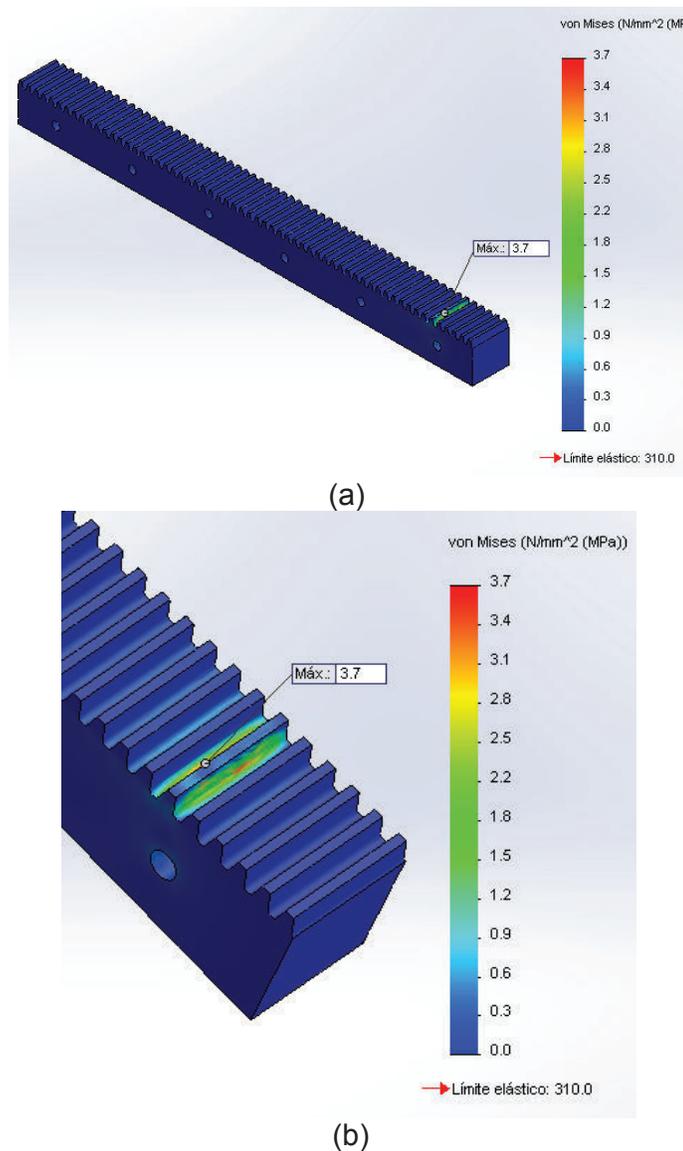


Figura 3.29. Esfuerzo de Von Mises en las cremalleras del eje X.
(a) Vista general, (b) Acercamiento a la zona crítica.

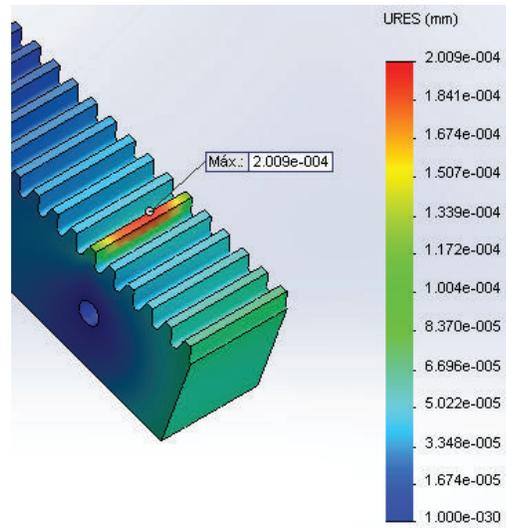


Figura 3.30. Desplazamiento máximo en las guías del eje X.

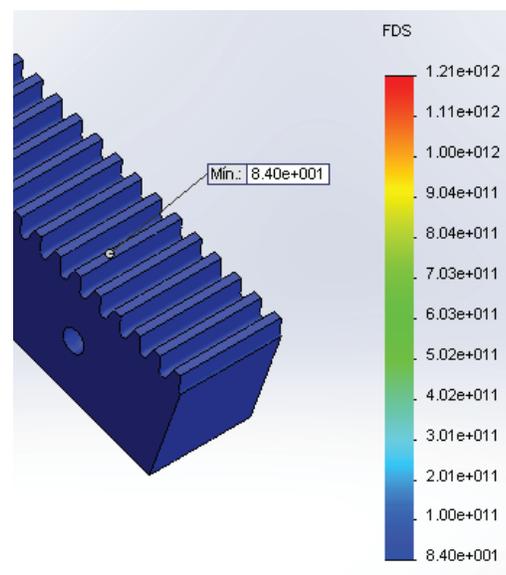
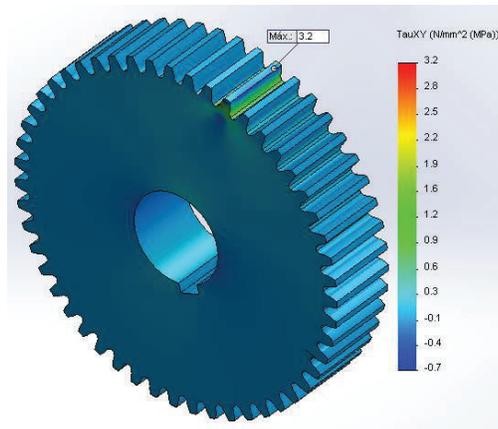


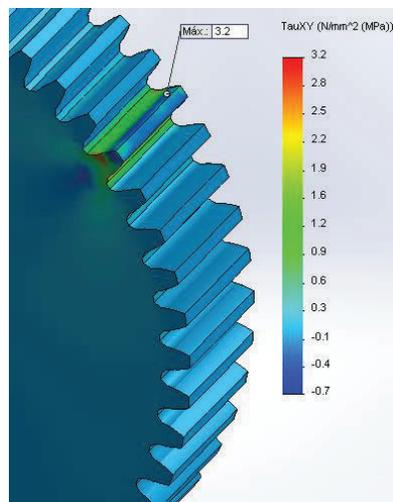
Figura 3.31. Factor de seguridad mínimo en las guías del eje X.

3.2.3.3. *Análisis de esfuerzos en la rueda dentada*

La rueda dentada del eje X, posee un ancho de cara aproximado de 28 mm (1-1/8"), 51 dientes y ángulo de presión de 14.5°. Las fuerzas son las mismas aplicadas a la cremallera. En las figuras 3.32 a 3.34 se indican los resultados.



(a)



(b)

Figura 3.32. Esfuerzo cortante máximo en la rueda dentada del eje X.
(a) Vista general, (b) Acercamiento a la zona crítica.

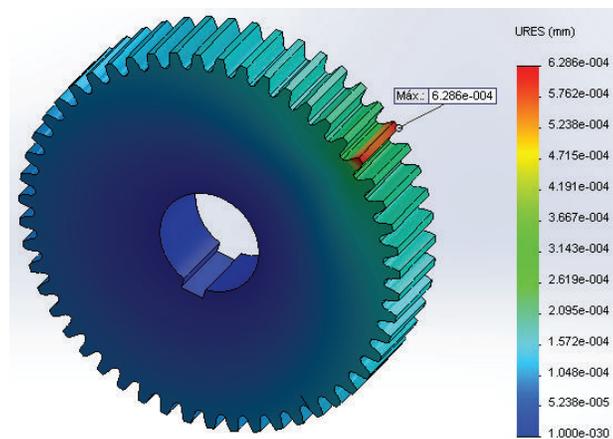


Figura 3.33. Desplazamiento máximo en la rueda dentada del eje X.

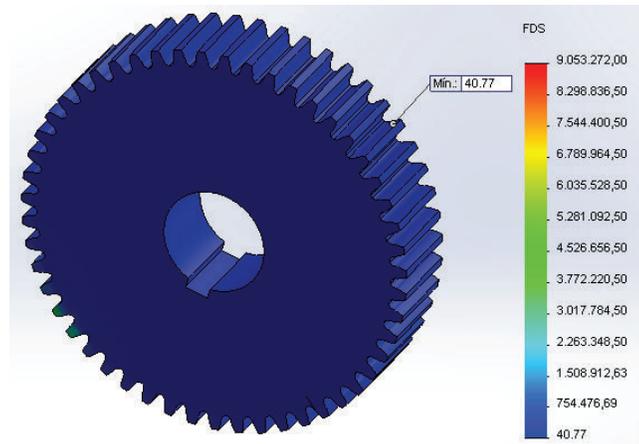


Figura 3.34. Factor de seguridad mínimo en la rueda dentada del eje X.

3.2.4. Análisis de esfuerzos en las ruedas de guías

Los patines de las guías tanto para el eje X como Y, son de las mismas dimensiones; por lo tanto se verifica para las reacciones más críticas, carga vertical 512.2 N y carga transversal 105.25 N. Los resultados de diseño en las se indican en las figuras 3.35 a 3.37.

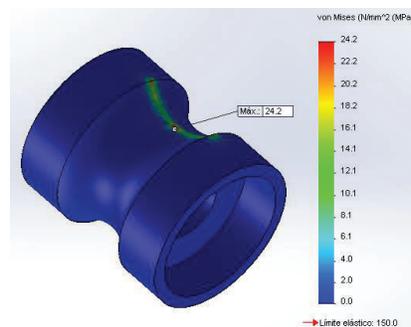


Figura 3.35. Esfuerzo de Von Mises en las ruedas de guías.

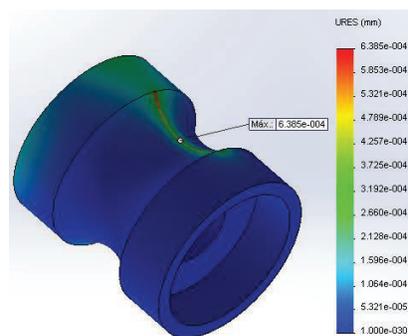


Figura 3.36. Desplazamiento máximo en las ruedas de guías.

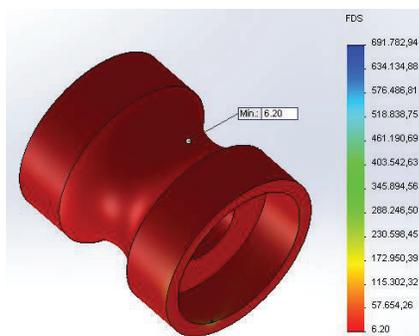


Figura 3.37. Factor de seguridad en las ruedas de guías.

3.2.5. Análisis de fatiga

Los elementos sujetos a ciclos de carga constante media o elevada tienden a fallar por fatiga. En este caso al tratarse de elementos que soportan cargas bajas, la fatiga no será un factor preponderante en el comportamiento de los elementos. De todas formas se analiza y verifica los factores de seguridad ante la fatiga. Uno de los factores que influye en la fatiga es el acabado superficial. En la tabla 3.11 se indican valores a utilizarse, mientras que en las tablas 3.12 a 3.19, se indica las ecuaciones, datos a utilizarse y resultados obtenidos, para el análisis de fatiga de los elementos mecánicos. En la tabla 3.20 se da el resumen de resultados del diseño.

Tabla 3.11. Factores de acabado superficial (51 pág. 318).

ACABADO DE SUPERFICIE	FACTOR a MPa	EXPONENTE b
Esmerilado (rectificado)	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

Tabla 3.12. Análisis de fatiga para tornillo rosca cuadrada.

TORNILLO ROSCA CUADRADA: ACERO AISI 1018				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de resistencia	$S_{ut} = 400 \text{ MPa}$	Límite de fatiga	$S'_e = 0.5 S_{ut}$ $\text{Si } S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$ (51 pág. 312)	$S'_e = 200 \text{ MPa}$
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	$a = 4.51$ $b = -0.265$	Factor de superficie	$ka = a S_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 0.92$
Diámetro interno y externo de la rosca	$d = 14.6 \text{ mm}$ $D = 19.05 \text{ mm}$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 0.93$

Tabla 3.12. Análisis de fatiga para tornillo rosca cuadrada, continuación.

Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc=1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd=1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	$\frac{D}{d} = 1.3 \approx 1.5$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt=3$ (51 págs. 848, figura A15-9)
Relación radio muesca y diámetro interno	$\frac{r}{d} = 0.005$			
Radio de muesca	$r \approx 0$	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 0.4$ (51 pág. 244)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt=3$ $q = 0.4$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt-1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.8$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 324)	$ke = 0.55$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se = 94.11 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max} = 5.4 MPa$ $\sigma_{min} = 0 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 2.7 MPa$
Esfuerzo mínimo		Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 2.7 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, Sut$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a + \sigma_m}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 28.22$
Límite de resistencia del material	$Sut = 400 MPa$	Coeficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9Sut)^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 1377.11$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 94.11 MPa$ $Sut = 400 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9Sut}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.194$
Coeficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a} \right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 9.05 \times 10^{13}$ Ciclos

Tabla 3.13. Análisis de fatiga guías del eje Y.

GUÍAS EJE Y: ACERO AISI 1018				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de resistencia	$Sut = 400 MPa$	Límite de fatiga	$S'e = 0.5 Sut$ $Sí Sut \leq 1400 MPa$ (51 pág. 312)	$S'e = 200 MPa$
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Laminado en caliente $a = 57.7$ $b = -0.718$	Factor de superficie	$ka = aS_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 0.78$
Diámetro del eje y diámetro de la perforación	$D = 25.4 mm$ $d = 5 mm$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 0.87$

Tabla 3.13. Análisis de fatiga guías del eje Y, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc=1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd=1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	$\frac{d}{D} = 0.2$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt=2$ (51 págs. 849, figura A15-11)
Radio de muesca	N/A	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q=1$ (51 pág. 244)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt=2$ $q=1$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf=1+q(kt-1)$ (51 pág. 243)	$kf=2$
			$ke=\frac{1}{kt}$ (51 pág. 324)	$ke=0.5$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se=ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se=67.86 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max}=11.5 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a=5.75 MPa$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{min}=0 MPa$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m=\frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m=5.75 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, Sut$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{S_{ur}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n=10.1$
Límite de resistencia del material	$Sut=400 MPa$	Coefficiente para estimar la duración	$a=\frac{(0.9Sut)^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a=1909.8$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se=67.86 MPa$ $Sut=400 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b=-\frac{1}{3}\log\frac{0.9Sut}{Se}$ (51 pág. 314)	$b=-0.242$
Coefficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N=\left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N=2.62 \times 10^{10}$ Ciclos

Tabla 3.14. Análisis de fatiga guías del eje X.

GUÍAS EJE X: ACERO AISI 1018				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de resistencia	$Sut=400 MPa$	Límite de fatiga	$S'e=0.5 Sut$ Si $Sut \leq 1400 MPa$ (51 pág. 312)	$S'e=200 MPa$
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Laminado en caliente $a=57.7$ $b=-0.718$	Factor de superficie	$ka=aS_{ur}^b$ (51 pág. 318)	$ka=0.78$
Diámetro del eje y diámetro de la perforación	$D=25.4 mm$ $d=5 mm$	Factor de tamaño	$kb=\left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb=0.87$

Tabla 3.14. Análisis de fatiga guías del eje X, continuación.

Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc=1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd=1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	$\frac{d}{D} = 0.2$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt=2$ (51 págs. 849, figura A15-11)
Radio de muesca	N/A	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q=1$ (51 pág. 244)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt=2$ $q=1$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf=1+q(kt-1)$ (51 pág. 243)	$kf=2$
			$ke=\frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke=0.5$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se=ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se=67.86 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max}=22.5 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a=11.25 MPa$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{min}=0 MPa$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m=\frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m=11.25 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, Sut$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n=5.16$
Límite de resistencia del material	$Sut=400 MPa$	Coficiente para estimar la duración	$a=\frac{(0.9Sut)^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a=1909.8$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se=67.86 MPa$ $Sut=400 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b=-\frac{1}{3} \log \frac{0.9Sut}{Se}$ (51 pág. 314)	$b=-0.242$
Coefficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N=\left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N=1.64 \times 10^9$ Ciclos

Tabla 3.15. Análisis de fatiga cremallera eje Y.

CREMALLERAS EJE Y: ACERO AISI 1045				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de resistencia	$Sut=565 MPa$	Límite de fatiga	$S'e=0.5 Sut$ Sí $Sut \leq 1400 MPa$ (51 pág. 312)	$S'e=282.5 MPa$
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Maquinado $a=4.51$ $b=-0.265$	Factor de superficie	$ka=aS_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka=0.84$
Dimensiones en la base del diente	$h=25$ $b=4$	Diámetro efectivo	$de=0.808(hb)^{\frac{1}{2}}$ (51 pág. 319)	$de=8.08$
Diámetro efectivo	$de=8.08$	Factor de tamaño	$kb=\left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb=1$

Tabla 3.15. Análisis de fatiga cremallera eje Y, continuación.

Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc=1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd=1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	$\frac{D}{d} = \infty$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt=1.65$ (51 págs. 846, figura A15-6)
Relación entre radio de raíz y espesor del diente	$\frac{r_f}{t} \frac{0.724}{4} = 0.18$			
Radio de muesca	$r_f = 0.724$	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 0.65$ (51 pág. 244)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt = 1.62$ $q = 0.65$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt - 1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.403$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke = 0.713$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	$ka kb kc kd ke$ $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se = 169.2 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max} = 2.2 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 1.1 MPa$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{min} = 0 MPa$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 1.1 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, Sut$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a + \sigma_m}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 118$
Límite de resistencia del material	$Sut = 565 MPa$	Coefficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9Sut)^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 1528.2$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 169.2 MPa$ $Sut = 565 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9Sut}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.159$
Coeficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a} \right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 5.84 \times 10^{19}$ Ciclos

Tabla 3.16. Análisis de fatiga cremallera eje X.

CREMALLERAS EJE X: ACERO AISI 1045				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de resistencia	$Sut = 565 MPa$	Límite de fatiga	$S'e = 0.5 Sut$ Si $Sut \leq 1400 MPa$ (51 pág. 312)	$S'e = 282.5 MPa$
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Maquinado $a = 4.51$ $b = -0.265$	Factor de superficie	$ka = aS_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 0.84$
Dimensiones en la base del diente	$h = 38$ $b = 6$	Diámetro efectivo	$de = 0.808 = (hb)^{1/2}$ (51 pág. 319)	$de = 12.2$

Tabla 3.16. Análisis de fatiga cremallera eje X, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Diámetro efectivo	$d_e = 12.2$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 0.95$
Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc = 1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd = 1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	$\frac{D}{d} = \infty$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt = 1.65$ (51 págs. 846, figura A15-6)
Relación entre radio de raíz y espesor del diente	$\frac{r_f}{t} = \frac{1.016}{6} = 0.17$			
Radio de muesca	$r_f = 1.016$	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 0.68$ (51 pág. 244)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt = 1.65$ $q = 0.68$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt - 1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.442$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke = 0.7$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se = 157.8 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\max} = 3.7 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 1.85 MPa$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\min} = 0 MPa$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 1.85 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, Sut$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 66.7$
Límite de resistencia del material	$S_{ut} = 565 MPa$	Coficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 1638.6$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 157.8 MPa$ $S_{ut} = 565 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.169$
Coficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 2.75 \times 10^{17}$ Ciclos

Tabla 3.17. Análisis de fatiga rueda dentada eje Y.

RUEDA DENTADA EJE Y: HIERO GRIS ASTM 40				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de tensión	$S_{ut} = 293 MPa$	Límite de fatiga	N/A	$S'_e = 127.73 MPa$ (51 págs. 863, figura A-24)
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Maquinado $a = 4.51$ $b = -0.265$	Factor de superficie	$ka = aS_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 1$
Dimensiones en la base del diente	$h = 20$ $b = 4$	Diámetro efectivo	$de = 0.808(hb)^{1/2}$ (51 pág. 319)	$de = 7.22$
Diámetro efectivo	$de = 7.22$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 1$
Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc = 1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd = 1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	N/A	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt = 1.25$ (51 págs. 863, figura A-24)
Relación entre radio de raíz y espesor del diente	N/A			
Radio de muesca	N/A	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 0.2$ (46 pág. 148)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt = 1.25$ $q = 0.2$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt - 1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.05$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke = 0.95$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke S'_e	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'_e$ (51 pág. 317)	$Se = 121.34 MPa$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max} = 1.9 MPa$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 0.95 MPa$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{min} = 0 MPa$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 0.95 MPa$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, S_{ut}$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 90.3$
Límite de resistencia del material	$S_{ut} = 293 MPa$	Coficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 573.08$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 121.34 MPa$ $S_{ut} = 293 MPa$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.112$
Coefficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 6.7 \times 10^{24}$ Ciclos

Tabla 3.18. Análisis de fatiga rueda dentada eje X.

RUEDA DENTADA EJE X: HIERO GRIS ASTM 40				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de tensión	$S_{ut} = 293 \text{ MPa}$	Límite de fatiga	N/A	$S'_e = 127.73 \text{ MPa}$ (51 págs. 863, figura A-24)
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Maquinado $a = 4.51$ $b = -0.265$	Factor de superficie	$ka = a S_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 1$
Dimensiones en la base del diente	$h = 28$ $b = 6$	Diámetro efectivo	$de = 0.808(hb)^{1/2}$ (51 pág. 319)	$de = 10.47$
Diámetro efectivo	$de = 10.47$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 0.96$
Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc = 1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd = 1$ (51 pág. 320)
Relación entre diámetros	N/A	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt = 1.25$ (51 págs. 863, figura A-24)
Relación entre radio de raíz y espesor del diente	N/A			
Radio de muesca	N/A	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 0.2$ (46 pág. 148)
Factores concentradores de esfuerzos	$kt = 1.25$ $q = 0.2$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt - 1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.05$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke = 0.95$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke S'_e	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'_e$ (51 pág. 317)	$Se = 116.5 \text{ MPa}$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\max} = 3.2 \text{ MPa}$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 1.6 \text{ MPa}$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\min} = 0 \text{ MPa}$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 1.6 \text{ MPa}$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, S_{ut}$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 52$
Límite de resistencia del material	$S_{ut} = 293 \text{ MPa}$	Coefficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9 S_{ut})^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 596.9$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 116.5 \text{ MPa}$ $S_{ut} = 293 \text{ MPa}$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9 S_{ut}}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.118$
Coeficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 6.23 \times 10^{21} \text{ Ciclos}$

Tabla 3.19. Análisis de fatiga rueda ruedas de guía.

RUEDA DE GUÍAS: BRONCE SAE 65				
Datos		Ecuación		Resultado
Límite de tensión	$S_{ut} = 305 \text{ MPa}$	Límite de fatiga	N/A	$S'e = 170 \text{ MPa}$ (52 pág. 1231)
Factores de acabado superficial: Tabla 3.7	Maquinado $a = 4.51$ $b = -0.265$	Factor de superficie	$ka = aS_{ut}^b$ (51 pág. 318)	$ka = 1$
Diámetros en la parte central de la rueda	$d_{EXT} = 28 \text{ mm}$ $d_{INT} = 15 \text{ mm}$	Diámetro efectivo	$de = \sqrt{d_{ext}^2 - d_{int}^2}$	$de = 23.64 \text{ mm}$
Diámetro efectivo	$de = 23.64 \text{ mm}$	Factor de tamaño	$kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ (51 pág. 318)	$kb = 0.88$
Tipo de carga	Flexión	Factor de carga	N/A	$kc = 1$ (51 pág. 320)
Velocidad de trabajo	Baja	Factor de temperatura	N/A	$kd = 1$ (51 pág. 320)
Relación entre radio de la muesca y el diámetro de garganta	$\frac{r}{D} = \frac{12.7}{28} = 0.45$	Factor de concentración de esfuerzos	N/A	$kt = 1.5$ (51 págs. 845, figura A15-4)
Relación entre diámetro de garganta y el diámetro exterior	$\frac{w}{D} = \frac{38}{28} = 1.36$			
Radio de muesca	$r = 12.7 \text{ mm}$	Sensibilidad a la muesca	N/A	$q = 1$
Factores concentradores de esfuerzos	$kt = 1.5$ $q = 1$	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga	$kf = 1 + q(kt - 1)$ (51 pág. 243)	$kf = 1.5$
			$ke = \frac{1}{kt}$ (51 pág. 243)	$ke = 0.666$
Factores de modificación de resistencia a la fatiga	ka, kb, kc, kd, ke $S'e$	Límite de resistencia a la fatiga modificado	$Se = ka kb kc kd ke S'e$ (51 pág. 317)	$Se = 99.63 \text{ MPa}$
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max} = 24.2 \text{ MPa}$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_a = 12.1 \text{ MPa}$
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{min} = 19.8 \text{ MPa}$	Esfuerzo a medio	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ (51 pág. 333)	$\sigma_m = 22 \text{ MPa}$
Amplitud de esfuerzo, esfuerzo medio, Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$\sigma_a, \sigma_m, Se, S_{ut}$	Factor de seguridad a la fatiga	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$ (51 pág. 337)	$n = 5.16$
Límite de resistencia del material	$S_{ut} = 305 \text{ MPa}$	Coefficiente para estimar la duración	$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{Se}$ (51 pág. 314)	$a = 756.3$
Límite de resistencia a la fatiga, Límite de resistencia del material	$Se = 99.63 \text{ MPa}$ $S_{ut} = 305 \text{ MPa}$	Exponente para estimar la duración	$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{Se}$ (51 pág. 314)	$b = -0.147$
Coefficientes para el cálculo de duración, amplitud de esfuerzo	a, b, σ_a	Duración esperada	$N = \left[\frac{\sigma_a}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (51 pág. 314)	$N = 1.65 \times 10^{12} \text{ Ciclos}$

Tabla 3.20. Resumen de resultados de diseño de elementos mecánicos.

Elemento	Esfuerzo	Desplazamiento	Factor de seguridad	Factor de seguridad a fatiga	Número de Ciclos
	[MPa]	[mm]			
Tornillo sinfin	5.4	0.486	41.0	28.2	9.05E+13
Guía eje Y	11.5	0.003	19.1	10.1	2.62E+10
Cremallera eje Y	2.2	8.24E-05	140	118	5.84E+19
Rueda dentada eje Y	1.9	2.86E-04	73.9	90.3	6.70E+24
Guía eje X	22.5	4.96E-03	13.8	5.2	1.69E+09
Cremallera eje X	3.7	2.00E-04	84.0	66.7	2.75E+17
Rueda dentada eje X	3.2	6.28E-04	40.8	52.0	6.23E+21
Ruedas	24.2	6.85E-04	6.2	5.2	1.65E+12

3.2.6. Pernos para sujetar elementos mecánicos

Los elementos de ajuste que se utilizan en las juntas entre partes mecánicas son los tornillos Allen. De las simulaciones de esfuerzos en los elementos mecánicos de los ítems 3.1.1 a 3.1.4, se obtiene las reacciones críticas en las perforaciones donde se alojarán los tornillos Allen. Tales reacciones se muestran en la tabla 3.21. Los parámetros que intervienen en esta conexión se indican en la figura 3.38 y los cálculos para la selección de tornillos entre los elementos mecánicos se muestran en la tabla 3.22 y 3.23.

Tabla 3.21. Reacciones en los elementos sujetos con pernos Allen.

Elementos	Fuerzas resultantes [N]		
	FX	FY	FZ
Guías de tornillo	48	0.0121	52.6
Guías eje Y	112	44.2	240
Cremallera Y	29.1	0.07	14.3
Guías eje X	75.5	2.78	414
Cremallera X	118	4.62	4.33
	Fuerzas cortantes		
	Fuerza axial		

Tabla 3.22. Análisis de junta entre soporte y guías del eje Y.

MATERIALES DE ELEMENTOS EN LA JUNTA: PERNOS ROSCA UNF ISO 9.8, ACERO ASTM A36, ACERO AISI1018				
Datos		Ecuación		Resultado
Diámetro nominal del tornillo	$d = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$	Espesor de apriete en t_2	$h = \frac{d}{2} \rightarrow t_2 \geq d$	$h = 0.003 \text{ m}$
Espesor elemento 2	$t_2 = 10 \text{ mm} = 0.010 \text{ m}$		$h = \frac{t_2}{2} \rightarrow t_2 < d$ (53 pág. 339)	
Espesor de arandela	$t_w = 1.5 \text{ mm} = 0.0015 \text{ m}$	Longitud efectiva de apriete	$Lg = t_w + t_1 + h = L_T$ (53 pág. 340)	$Lg = 0.0205 \text{ m}$
Espesor elemento 1	$t_1 = 16 \text{ mm} = 0.016 \text{ m}$			
Espesor de apriete en t_2	$h = 0.003 \text{ m}$			

Tabla 3.22. Análisis de junta entre soporte y guías del eje Y, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Longitud efectiva de apriete	$Lg = 0.0205 \text{ m}$	Espesor medio	$t_m = \frac{Lg}{2} - h$ (53 pág. 340)	$t_m = 0.00725 \text{ m}$
Espesor de apriete en t_2	$h = 0.003 \text{ m}$			
Diámetro nominal del tornillo	$d = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$	Diámetro especial	$D^* = 1.5d + 2htan\alpha$ (53 pág. 340)	$D^* = 0.0125 \text{ m}$
Espesor de apriete en t_2	$h = 0.003 \text{ m}$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor medio	$k_m = \frac{\pi \tan \alpha Ed}{\ln \left[\frac{(2t_m \tan \alpha + D^* - d)(D^* + d)}{(2t_m \tan \alpha + D^* + d)(D^* - d)} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_m = 4.93 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Diámetro nominal del tornillo	$d = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Diámetro especial	$D^* = 0.0125 \text{ m}$			
Espesor medio	$t_m = 0.00725 \text{ m}$			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor teórico 1	$k_1 = \frac{\pi \tan \alpha Ed}{\ln \left[5 \frac{2t \tan \alpha + 0.5d}{2t \tan \alpha + 2.5d} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_1 = 2.22 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Diámetro nominal del tornillo	$d = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Espesor teórico 1	$t = \frac{Lg}{2} = 0.01025 \text{ m}$			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor teórico 2	$k_2 = \frac{\pi \tan \alpha Ed}{\ln \left[5 \frac{2t \tan \alpha + 0.5d}{2t \tan \alpha + 2.5d} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_2 = 4.02 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Diámetro nominal del tornillo	$d = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Espesor teórico 2	$t = h = 0.003 \text{ m}$			
Rigidez en el espesor medio	$k_m = 4.93 \times 10^9 \frac{N}{m}$	Rigidez de los elementos a unir	$\frac{1}{k_{MEM}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_m}$ (53 pág. 326)	$k_{MEM} = 1.11 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Rigidez en el espesor teórico 1	$k_1 = 2.22 \times 10^9 \frac{N}{m}$			
Rigidez en el espesor teórico 2	$k_2 = 4.02 \times 10^9 \frac{N}{m}$			
Diámetro nominal	$d = 0.006 \text{ m}$	Diámetro de paso	$dp = \frac{d + dr}{2}$ (54 pág. 28)	$dp = 0.00539 \text{ m}$
Diámetro de raíz	$dr = 0.00477 \text{ m}$ (54 pág. 8)			
Diámetro de raíz	$dr = 0.00477 \text{ m}$ (54 pág. 8)	Área de esfuerzo a tracción	$At = \frac{\pi}{4} \left(\frac{dp + dr}{2} \right)^2$ (54 pág. 28)	$At = 2.025 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez del tornillo	$k_T = \frac{AtE}{L_T}$ (53 pág. 323)	$k_T = 2.04 \times 10^8 \frac{N}{m}$
Área de esfuerzo	$At = 2.025 \times 10^{-5} \text{ m}^2$			
Longitud efectiva de apriete	$L_T = 0.0205 \text{ m}$			
Rigidez de los elementos a unir	$k_{MEM} = 1.11 \times 10^9 \frac{N}{m}$	Constante de la junta	$C = \frac{k_T}{k_T + k_{MEM}}$ (53 pág. 334)	$C = 0.156$
Rigidez del tornillo	$k_T = 2.04 \times 10^8 \frac{N}{m}$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 2.025 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	Fuerza de prueba	$Fp = SpAt$ (53 pág. 332)	$Fp = 13162 \text{ N}$
Carga de prueba	$Sp = 650 \text{ MPa}$			

Tabla 3.22. Análisis de junta entre soporte y guías del eje Y, continuación.

Datos		Ecuación		Resultado
Fuerza de prueba	$F_p = 13162 N$	Fuerza de precarga	$F_{prec} = 0.75 * F_p$ (53 pág. 332)	$F_{prec} = 9871 N$
Coefficiente de junta	Desmontable: 0.75 (51 pág. 395)			
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 9871 N$	Factor de seguridad del perno	$n_p = \frac{F_p - F_{prec}}{CP}$ (53 pág. 335)	$n_p = 88$
Fuerza de prueba	$F_p = 13162 N$			
Constante de la junta	$C = 0.156$			
Fuerza axial en la junta	$P = 240 N$	Factor de seguridad en contra de la separación	$n_{SEPAR.} = \frac{F_{prec}}{P(1-C)}$ (53 pág. 336)	$n_{SEPAR.} = 49$
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 9871 N$			
Fuerza axial en la junta	$P = 240 N$			
Constante de la junta	$C = 0.156$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{CP}{2At}$ (53 pág. 338)	$\sigma_a = 0.92 MPa$
Fuerza axial en la junta	$P = 240 N$			
Constante de la junta	$C = 0.156$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 2.025 \times 10^{-5} m^2$	Esfuerzo alternado	$S_a = \frac{S_{ut} - \frac{F_{prec}}{At}}{1 + \frac{S_{ut}}{S_e}}$ (53 pág. 339)	$S_a = 55.53 MPa$
Resistencia última del perno	$S_{ut} = 900 MPa$			
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 9871 N$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 2.025 \times 10^{-5} m^2$			
Límite de resistencia a la fatiga del perno	$S_e = 140 MPa$ (51 pág. 400)	Factor de seguridad a fatiga	$n_{fat} = \frac{S_a}{\sigma_a}$ (53 pág. 338)	$n_{fat} = 60$
Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = 0.92 MPa$			
Esfuerzo alternado	$S_a = 55.53 MPa$	Esfuerzo medio	$\sigma_m = \sigma_a + \frac{F_{prec}}{At}$ (53 pág. 338)	$\sigma_m = 488.4 MPa$
Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = 0.92 MPa$			
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 9871 N$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 2.025 \times 10^{-5} m^2$	Esfuerzo cortante	$\tau = \frac{V}{\frac{\pi dr^2}{4}}$ (54 pág. 26)	$\tau = 6.74 MPa$
Cortante	$V = 120.4 N$			
Diámetro de raíz	$dr = 0.00477 m$ (54 pág. 8)	Factor de seguridad a cortante	$n_c = \frac{S_y}{\tau}$	$n_c = 107$
Límite de fluencia del perno	$S_y = 720 MPa$			
Esfuerzo cortante	$\tau = 6.74 MPa$	Factor de seguridad combinado	$N = \left[\frac{1}{n_p^2} + \frac{1}{n_c^2} \right]^{\frac{1}{2}}$ (54 pág. 26)	$N = 68$
Factor de seguridad a cortante	$n_c = 107$			
Factor de seguridad del perno	$n_p = 88$			

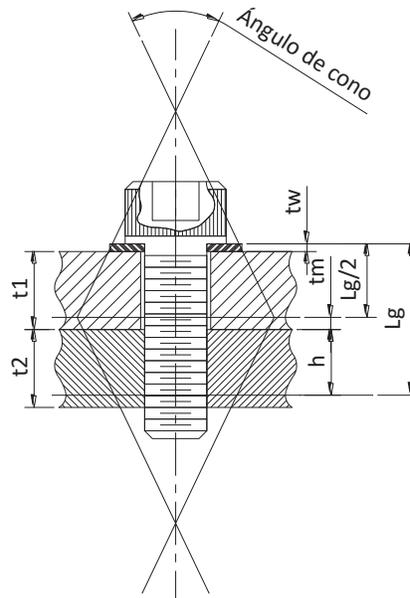


Figura 3.38. Parámetros que intervienen en la junta con pernos Allen.
 Lg: longitud efectiva de apriete, h: espesor de apriete en t2, tm: espesor medio, t1: espesor elemento 1, t2: espesor elemento 2 (roscado), tw: espesor de arandela.
 (53 pág. 340)

Tabla 3.23. Resumen de selección de pernos en juntas de elementos mecánicos.

Fuerza cortante [N]	Fuerza tensión o compresión [N]	Espesor 1 [mm]	Espesor 2 [mm]	CLASE				Dimensión	Longitud roscada en la junta	Longitud no roscada
		t1 [mm]	t2 [mm]	Sp [Mpa]	Se [Mpa]	Sut [Mpa]	Sy [Mpa]		LT [mm]	LUT [mm]
48.0	52.6	6	20	650	140	900	720	M6x25	10.5	0.00
120.4	240.0	16	10	650	140	900	720	M6x25	20.5	0.00
32.4	50.0	15	8	650	140	900	720	M8x35	20.5	0.00
75.6	414.0	15	8	650	140	900	720	M6x25	19.5	0.00
118.1	4.6	30	6	650	140	900	720	M8x40	35.5	0.00

Área nominal	Rigidez del perno	Material Parte 1	Modulo elasticidad	Material Parte 2	Modulo elasticidad	Área de esfuerzo	Espesor arandela	h	LT=Lgrip	tm	D*
AUT [mm ²]	kb [N/m]		[N/m ²]		[N/m ²]	At [m ²]	tw [mm]	[m]	[m]	[m]	[m]
28.3	3.99E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	2.025E-05	1.5	0.003	0.0105	0.00225	0.0125
28.3	2.04E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	2.025E-05	1.5	0.003	0.0205	0.00725	0.0125
50.3	3.72E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	3.688E-05	1.5	0.004	0.0205	0.00625	0.0166
28.3	2.15E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	2.025E-05	1.5	0.003	0.0195	0.00675	0.0125
50.3	2.15E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	3.688E-05	1.5	0.004	0.0355	0.01375	0.0166

km	k1	k2	kmem	C	Fp	Fprec	np	nsepar	σa	Sa	nfat	σm	ζ	nc	N
[N/m]	[N/m]	[N/m]	[N/m]	N/A	[N]	[N]	N/A	N/A	[MPa]	[MPa]	N/A	[MPa]	[MPa]	N/A	N/A
1.09E+10	2.94E+09	4.02E+09	1.47E+09	0.214	13161	9871	293	239	0.28	55.53	200	487.78	2.69	268	198
4.93E+09	2.22E+09	4.02E+09	1.11E+09	0.156	13161	9871	88	49	0.92	55.53	60	488.42	6.74	107	68
8.55E+09	3.30E+09	5.36E+09	1.65E+09	0.184	23972	17979	650	441	0.12	55.53	444	487.62	0.99	730	486
5.13E+09	2.26E+09	4.02E+09	1.13E+09	0.160	13161	9871	50	28	1.64	55.53	34	489.14	4.23	170	48
5.49E+09	2.71E+09	5.36E+09	1.36E+09	0.137	23972	17979	9483	4508	0.01	55.53	6481	487.51	3.59	200	200

3.2.7. Viga soporte de mecanismos Y - Z

La viga que soporta el peso de los mecanismos Y-Z, y a la vez se mueve longitudinalmente, también soporta la fuerza que se produce por el movimiento la masa de los elementos que conforman los mecanismos Y-Z. Estas fuerzas son aplicadas en el centro de la viga, con el objetivo de simular una condición extrema de trabajo, peso de los mecanismos: 385 N, fuerza tangencial 47.6 N, fuerza radial 12.3 N. Viga perfil UPN 180, longitud 2300 mm, acero ASTM A36, resistencia última 400 MPa, resistencia a la fluencia 250 MPa. En las figuras 3.39 a 3.41, se indican los resultados de diseño para este elemento.

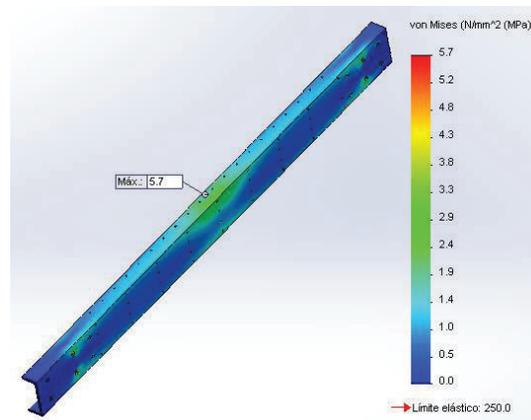


Figura 3.39. Esfuerzo de Von Mises en la viga eje Y.

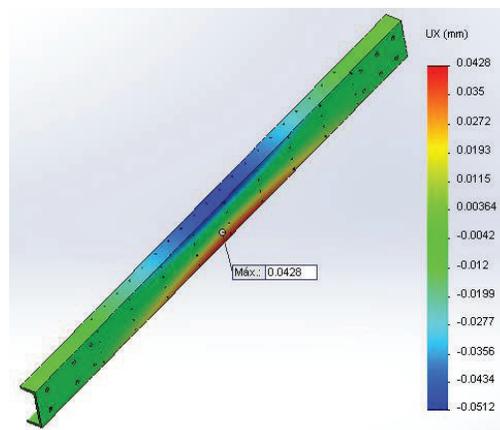


Figura 3.40. Desplazamiento máximo en la viga eje Y.

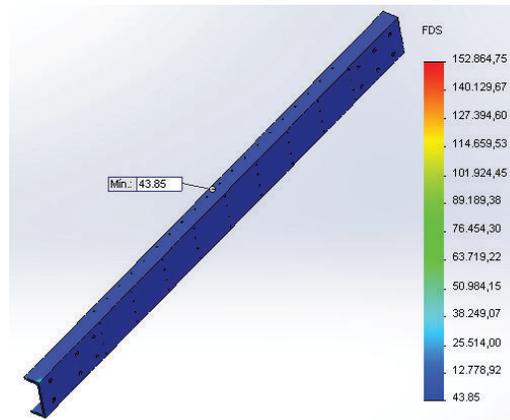


Figura 3.41. Factor de seguridad mínimo en la viga eje Y.

3.3. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE MESA

La estructura soporte de la mesa de corte mediante plasma, está sujeta a cargas en movimiento, por el recorrido del eje longitudinal o eje X y cargas estáticas, como es el peso de la plancha a ser cortada. Por facilidad de construcción y montaje se divide la estructura en elementos individuales como con vigas y columnas, tales elementos serán unidos con pernos. En la figura 3.42 se muestran los elementos que conforman esta estructura.

3.3.1. Análisis de fuerzas aplicadas

El programa para el análisis de la estructura es el SAP2000. Las fuerzas que intervienen para el análisis son las siguientes:

- Reacciones provocadas por la carga en movimiento de los mecanismos X-Y-Z; datos en la tabla 3.10.
- Peso de elementos estructurales adicionales como las platinas soportes de plancha: 1697 N, guías de mecanismo del eje X: 687.72 N, ángulos soporte de platinas: 475.1 N.
- Peso de la plancha a ser cortada, las dimensiones son las siguientes: 2440x1220x35 mm: 8015.22 N; que representa el máximo espesor a ser cortado.

- Peso del contenedor: 664.44 N y del agua dentro del mismo: 4263 N. Las dimensiones del contenedor son las siguientes: largo 2900 mm, ancho 1500 mm y altura 100 mm:

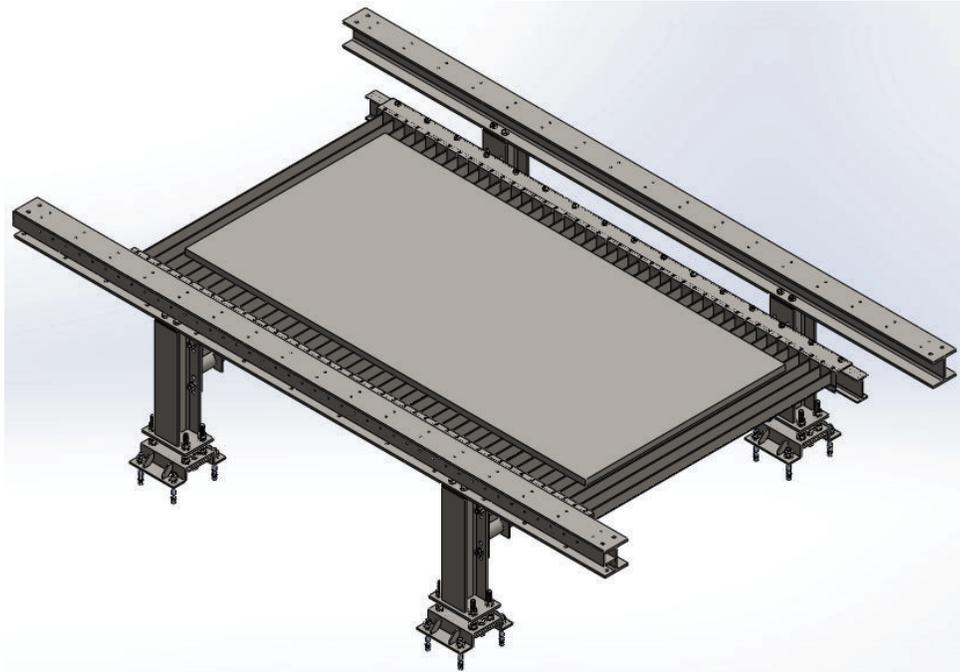


Figura 3.42. Vista general de la estructura de mesa de corte mediante plasma.

3.3.2. Método de diseño y combinaciones de carga

El método de diseño utilizado es el ASD, de la norma AISC 360/IBC 2006. Las combinaciones de este método son las siguientes: $1D+1L$, donde D es la carga muerta y L , son las reacciones calculadas en la tabla 3.10. El material para todos los elementos es el acero ASTM A-36. En las figuras 3.43 a 3.44, se indica la asignación de perfiles para cada uno de los elementos que conforman la estructura de la mesa de corte. En las figuras 3.45 a 3.47, se muestra la asignación de cargas. En la figura 3.48, se muestra el resultado de diseño para los elementos de la estructura. En la tabla 3.24 y 3.25, se da los desplazamientos resultantes para las vigas longitudinales (HEB 140) y las vigas soporte de plancha (IPE120).

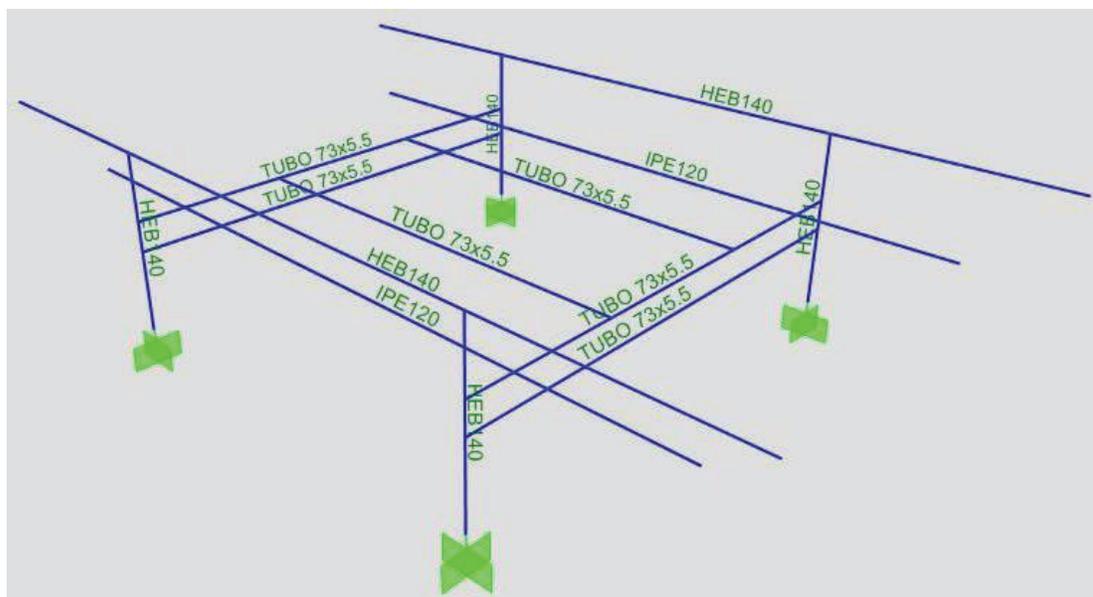


Figura 3.43. Materiales asignados a la estructura de la mesa de corte.

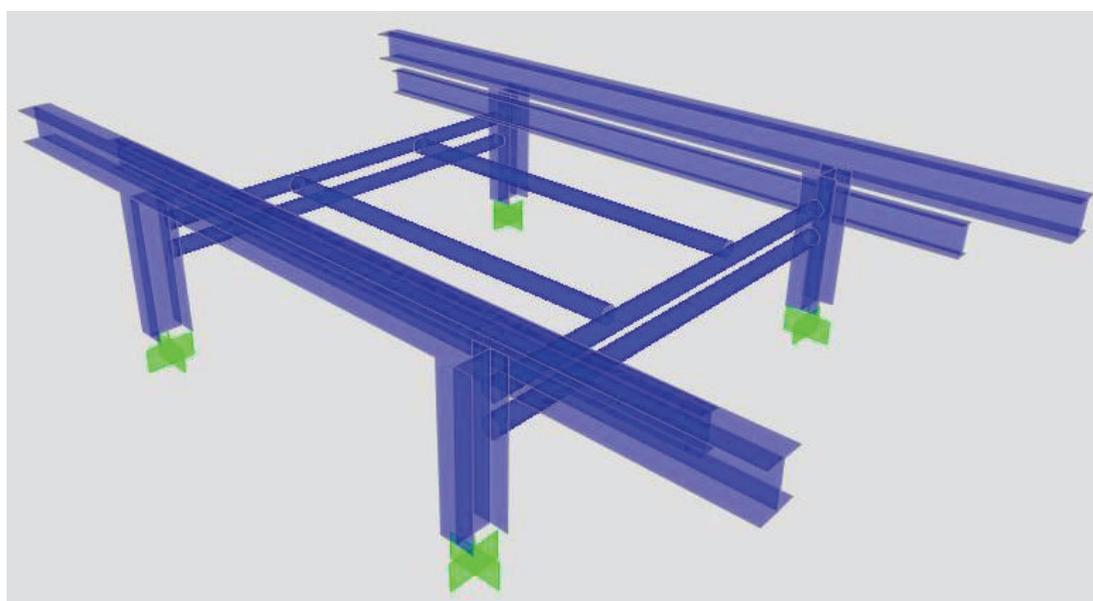


Figura 3.44. Vista tridimensional estructura para la mesa de corte.

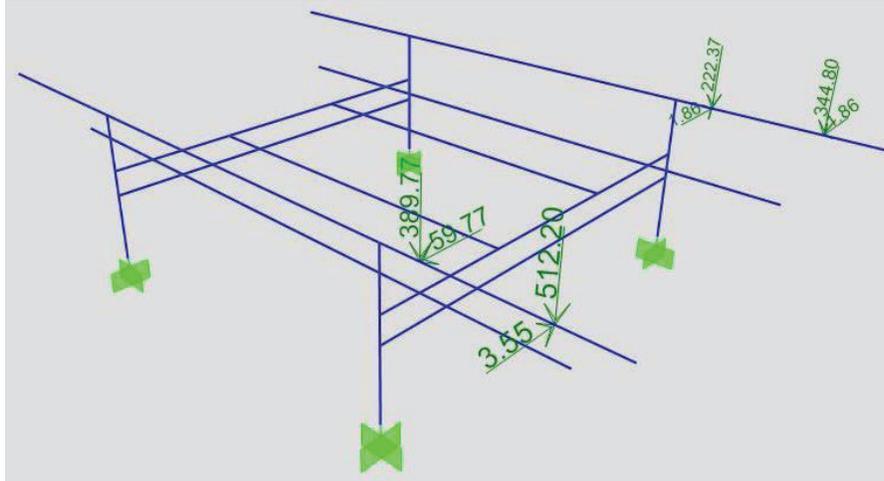


Figura 3.45. Asignación de cargas producidas por el movimiento de los mecanismos [N].

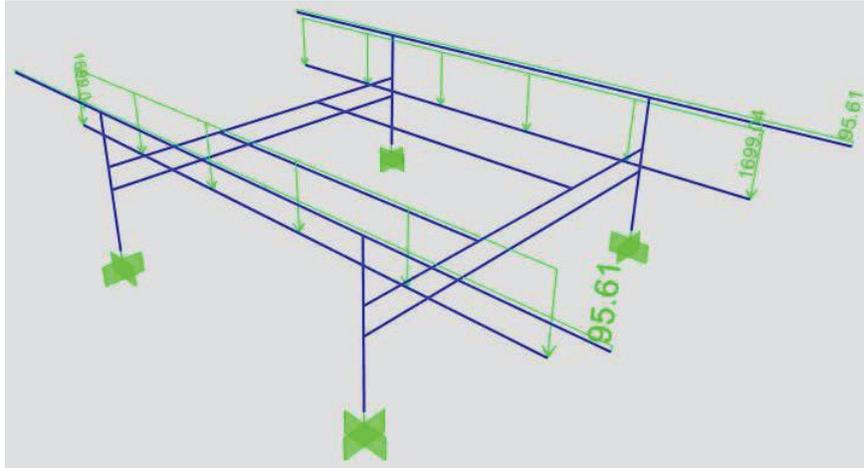


Figura 3.46. Asignación de peso de guías y soportes de plancha [N/m].

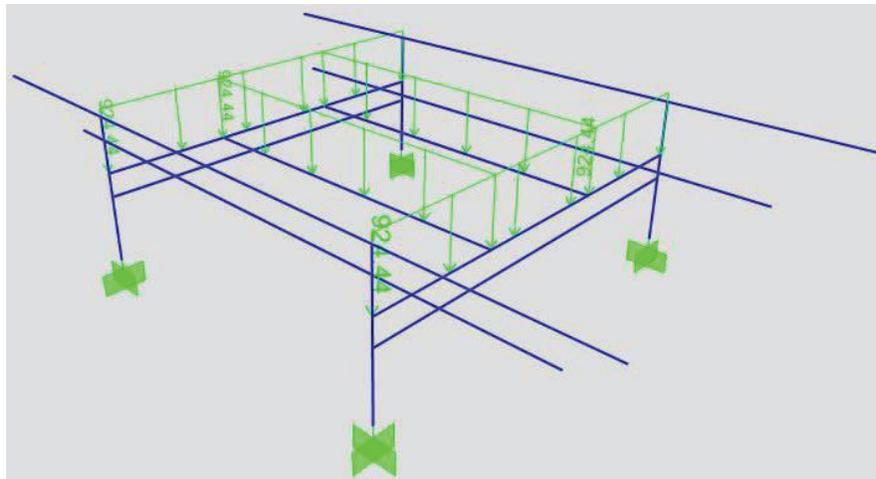


Figura 3.47. Asignación de peso de plancha, contenedor y agua [N/m].

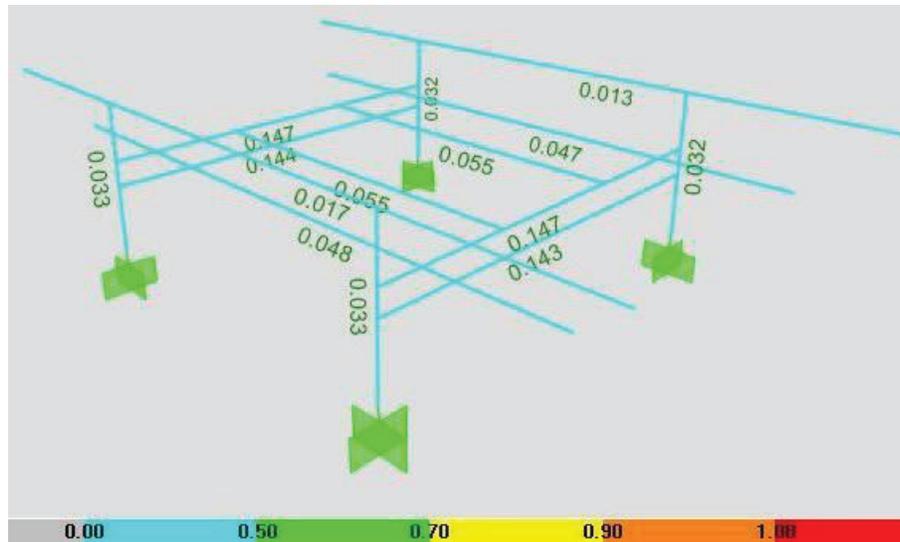


Figura 3.48. Relación de esfuerzos en la estructura.

Tabla 3.24. Desplazamiento en las vigas longitudinales (HEB140).

Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
9	Caso 1	Combination	-0.02581	-0.006852	-0.000865	-0.000005492	-0.000064	4.308E-07
10	Caso 1	Combination	0.025208	-0.011665	0.004487	-0.000009896	0.000067	0.000000646
25	Caso 1	Combination	0.022145	-0.01	-0.021531	-0.000024	0.000065	0.000002219
26	Caso 1	Combination	0.030131	-0.024174	-0.139545	0.000158	0.00007	0.000001626
27	Caso 1	Combination	-0.021149	-0.005031	-0.023431	-0.000025	-0.000065	-0.00000355
28	Caso 1	Combination	-0.018525	-0.014635	-0.087648	0.000099	-0.000064	0.00000553

Tabla 3.25. Desplazamiento en las vigas soporte de planchas (IPE120).

Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
11	Caso 1	Combination	-0.006185	-0.003424	-0.226112	-0.000001316	-0.000535	1.029E-07
12	Caso 1	Combination	0.008026	-0.005036	-0.226184	-0.000001491	0.000536	5.727E-07
117	Caso 1	Combination	-0.002835	-0.007595	-0.039299	0.000002242	0.000534	0.00001
118	Caso 1	Combination	0.000053	-0.006008	-0.040519	4.906E-07	-0.000534	-0.00000587
119	Caso 1	Combination	-0.000678	-0.000945	-0.048955	0.000011	0.000537	-0.00000825
120	Caso 1	Combination	0.001677	0.000144	-0.045646	0.000007084	-0.000535	0.00000739

3.3.3. Pernos para la estructura

Los pernos para la unión entre elementos estructurales son los de cabeza hexagonal. Las reacciones para el dimensionamiento de estos pernos están en los resultados del análisis estructural, los mismos son indicados en la tabla 3.26, los parámetros que intervienen en esta conexión se indican en la figura 3.49, y los cálculos para la selección de tornillos entre los elementos mecánicos se muestran en las tablas 3.27 y 3.28.

Tabla 3.26. Reacciones en los elementos sujetos con pernos cabeza hexagonal.

Elementos	Fuerza cortante [N]	Fuerza axial [N]
Columna - base de anclaje	2155.2	2959.6
Columnas vigas longitudinales	3507.7	3951.8
Columnas vigas transversales	3696.5	2427.4
Vigas soporte de plancha	1583.0	2104.6

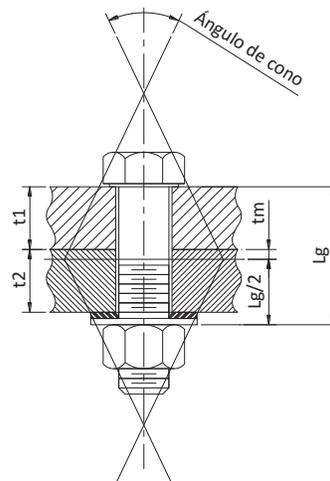


Figura 3.49. Parámetros que intervienen en la junta con pernos hexagonales.

Lg: longitud efectiva de apriete, tm: espesor medio, t1: espesor elemento 1, t2: espesor elemento 2, tw: espesor de arandela y/o de presión. (53 pág. 327)

Tabla 3.27. Análisis de junta entre columnas y vigas transversales.

MATERIALES DE ELEMENTOS EN LA JUNTA: PERNOS ROSCA UNF SAE GR 5 Y ACERO ASTM A36				
Datos		Ecuación		Resultado
Espesor elemento 1	$t_1 = 8 \text{ mm} = 0.008 \text{ m}$	Longitud de apriete	$Lg = L_{UT} + L_w$ $Lg = t_1 + t_2 + t_w$ (53 pág. 323)	$Lg = 0.027 \text{ m}$
Espesor elemento 2	$t_2 = 12 \text{ mm} = 0.012 \text{ m}$			
Espesor de arandelas	$t_w = 8 \text{ mm} = 0.008 \text{ m}$			
Longitud de apriete	$Lg = 0.027 \text{ m}$	Espesor medio	$t_m = t_2 - \frac{Lg}{2} - t_w$ (53 pág. 326)	$t_m = 0.0055 \text{ m}$
Espesor elemento 2	$t_2 = 12 \text{ mm} = 0.012 \text{ m}$			
Espesor de arandelas	$t_w = 8 \text{ mm} = 0.008 \text{ m}$			
Diámetro de perno	$d = 0.0158 \text{ m}$	Diámetro especial	$D^* = 1.5d + (Lg - 2t_m) \tan \alpha$ (53 pág. 327)	$D^* = 0.033 \text{ m}$
Longitud de apriete	$Lg = 0.027 \text{ m}$			
Espesor medio	$t_m = 0.0055 \text{ m}$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			

Tabla 3.27. Análisis de junta entre columnas y vigas transversales, continuación.

Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor medio	$k_m = \frac{\pi \tan \alpha E d}{\ln \left[\frac{(2t_m \tan \alpha + D^* - d)(D^* + d)}{(2t_m \tan \alpha + D^* + d)(D^* - d)} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_m = 3.09 \times 10^{10} \frac{N}{m}$
Diámetro del perno	$d = 0.0158 m$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Diámetro especial	$D^* = 0.033 m$			
Espesor medio	$t_m = 0.0055 m$			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor teórico 1	$k_1 = \frac{\pi \tan \alpha E d}{\ln \left[5 \frac{2t \tan \alpha + 0.5d}{2t \tan \alpha + 2.5d} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_1 = 1.06 \times 10^{10} \frac{N}{m}$
Diámetro del perno	$d = 0.0158 m$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Espesor elemento 1	$t_1 = 8 mm = 0.008 m$			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez en el espesor teórico 2	$k_2 = \frac{\pi \tan \alpha E d}{\ln \left[5 \frac{2t \tan \alpha + 0.5d}{2t \tan \alpha + 2.5d} \right]}$ (53 pág. 327)	$k_2 = 7.89 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Diámetro del perno	$d = 0.0158 m$			
Ángulo de cono	$\alpha = 30^\circ$ (53 pág. 327)			
Espesor teórico 2	$t = \frac{Lg}{2} = 0.0135 m$			
Rigidez en el espesor medio	$k_m = 3.09 \times 10^{10} \frac{N}{m}$	Rigidez de los elementos a unir	$\frac{1}{k_{MEM}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_m}$ (53 pág. 326)	$k_{MEM} = 3.95 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Rigidez en el espesor teórico 1	$k_1 = 1.06 \times 10^{10} \frac{N}{m}$			
Rigidez en el espesor teórico 2	$k_2 = 7.89 \times 10^9 \frac{N}{m}$			
Módulo de elasticidad del acero	$E = 207 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$	Rigidez del tornillo	$k_T = \frac{AE}{L_T}$ (53 pág. 323)	$k_T = 1.27 \times 10^9 \frac{N}{m}$
Área de esfuerzo a tracción	$At = 1.65 \times 10^{-4} m^2$ (51 pág. 370)			
Longitud de apriete	$Lg = L_T = 0.027 m$			
Rigidez de los elementos a unir	$k_{MEM} = 3.95 \times 10^9 \frac{N}{m}$	Constante de la junta	$C = \frac{k_T}{k_T + k_{MEM}}$ (53 pág. 334)	$C = 0.243$
Rigidez del tornillo	$k_T = 1.27 \times 10^9 \frac{N}{m}$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 1.65 \times 10^{-4} m^2$ (51 pág. 370)	Fuerza de prueba	$Fp = SpAt$ (53 pág. 332)	$Fp = 96949 N$
Carga de prueba	$Sp = 587 MPa$			
Fuerza de prueba	$Fp = 96949 N$	Fuerza de precarga	$Fprec = 0.75 * Fp$ (53 pág. 332)	$Fprec = 72712 N$
Coeficiente de junta	Desmontable: 0.75			
Fuerza de precarga	$Fprec = 72712 N$	Factor de seguridad del perno	$n_p = \frac{Fp - Fprec}{CP}$ (53 pág. 335)	$n_p = 41$
Fuerza de prueba	$Fp = 96949 N$			
Constante de la junta	$C = 0.243$			
Fuerza axial en la junta	$P = 2427.4 N$	Factor de seguridad en contra de la separación	$n_{SEPAR.} = \frac{Fprec}{P(1 - C)}$ (53 pág. 336)	$n_{SEPAR.} = 40$
Fuerza de precarga	$Fprec = 72712 N$			
Fuerza axial en la junta	$P = 2427.4 N$			
Fuerza axial en la junta	$P = 2427.4 N$	Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = \frac{CP}{2At}$ (53 pág. 338)	$\sigma_a = 1.79 MPa$
Constante de la junta	$C = 0.243$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 1.65 \times 10^{-4} m^2$ (51 pág. 370)			

Tabla 3.27. Análisis de junta entre columnas y vigas transversales, continuación.

Resistencia última del perno	$S_{ut} = 828 \text{ MPa}$	Esfuerzo alternado	$S_a = \frac{S_{ut} - \frac{F_{prec}}{At}}{1 + \frac{S_{ut}}{Se}}$ (53 pág. 339)	$S_a = 51.92 \text{ MPa}$
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 72712 \text{ N}$			
Área de esfuerzo a tracción	$At = 1.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (51 pág. 370)			
Límite de resistencia a la fatiga del perno	$Se = 128 \text{ MPa}$ (51 pág. 400)			
Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = 1.79 \text{ MPa}$	Factor de seguridad a fatiga	$n_{fat} = \frac{S_a}{\sigma_a}$ (53 pág. 338)	$n_{fat} = 29$
Esfuerzo alternado	$S_a = 51.92 \text{ MPa}$			
Amplitud de esfuerzo	$\sigma_a = 1.79 \text{ MPa}$	Esfuerzo medio	$\sigma_m = \sigma_a + \frac{F_{prec}}{At}$ (53 pág. 338)	$\sigma_m = 442.04 \text{ MPa}$
Fuerza de precarga	$F_{prec} = 72712 \text{ N}$			
Área de esfuerzo a tracción	$Se = 128 \text{ MPa}$ (51 pág. 400)			
Cortante	$V = 3696.5 \text{ N}$	Esfuerzo cortante	$\tau = \frac{V}{\frac{\pi d r^2}{4}}$ (54 pág. 26)	$\tau = 23.87 \text{ MPa}$
Área de raíz	$At = 1.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (51 pág. 370)			
Límite de fluencia del perno	$S_y = 635 \text{ MPa}$	Factor de seguridad a cortante	$n_c = \frac{S_y}{\tau}$	$n_c = 27$
Esfuerzo cortante	$\tau = 23.87 \text{ MPa}$			
Factor de seguridad a cortante	$n_c = 27$	Factor de seguridad combinado	$N = \left[\frac{1}{n_p^2} + \frac{1}{n_c^2} \right]^{\frac{1}{2}}$ (54 pág. 26)	$N = 22$
Factor de seguridad del perno	$n_p = 41$			

Tabla 3.28. Resumen de selección de pernos en juntas de estructura soporte.

Elementos	Fuerza cortante [N]	Fuerza axial [N]	Espesor 1 [mm]	Espesor 2 [mm]	SAE			GR 5	Dimensión [in]
			t1 [mm]	t2 [mm]	Sp [Mpa]	Se [Mpa]	Sut [Mpa]	Sy [Mpa]	
Columna - base de anclaje	2155.2	2959.6	16	12	587	128	828	635	3/4X6
Columnas - vigas longitudinales	3507.7	3951.8	12	10	587	128	828	635	5/8X2
Columnas - vigas transversales	3696.5	2427.4	8	12	587	128	828	635	5/8X2
Vigas soporte de plancha	1583.0	2104.6	6	8	587	128	828	635	3/8x1-1/2

Longitud roscada	Longitud no roscada	Rigidez del perno	Material Parte 1	Modulo elasticidad	Material Parte 2	Modulo elasticidad	Área	Área	Espesor arandela	LT=Lgrip	tm	D*
LT [mm]	LUT [mm]	kb [N/m]		[N/m ²]		[N/m ²]	Ar [m ²]	At [m ²]	tw [mm]	[m]	[m]	[m]
36.0	0.00	1.38E+09	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	2.26E-04	2.41E-04	8	0.0360	0.0020	0.047
29.0	0.00	1.18E+09	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	1.55E-04	1.65E-04	7	0.0290	0.0025	0.038
27.0	0.00	1.27E+09	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	1.55E-04	1.65E-04	7	0.0270	0.0055	0.033
9.9	10.10	6.54E+08	Acero	2.07E+11	Acero	2.07E+11	5.22E-05	5.66E-05	6	0.0200	0.0040	0.021

km	k1	k2	kmem	C	Fp	Fprec	np	nsepar	σ_a	Sa	nfat	σ_m	ζ	nc	N
[N/m]	[N/m]	[N/m]	[N/m]	N/A	[N]	[N]	N/A	N/A	[MPa]	[MPa]	N/A	[MPa]	[MPa]	N/A	N/A
1.59E+11	9.53E+09	8.99E+09	4.50E+09	0.235	141232	105924	51	47	1.45	51.92	36	441.70	9.52	67	40
8.29E+10	8.39E+09	7.62E+09	3.81E+09	0.236	96949	72712	26	24	2.83	51.92	18	443.08	22.65	28	19
3.09E+10	1.06E+10	7.89E+09	3.95E+09	0.243	96949	72712	41	40	1.79	51.92	29	442.04	23.87	27	22
1.85E+10	5.56E+09	4.28E+09	2.14E+09	0.234	33251	24938	17	15	4.35	51.92	12	444.60	30.33	21	13

En general el movimiento de los mecanismos no produce esfuerzos significativos en todos los elementos de la máquina, en las tablas de resultados los factores de seguridad son muy altos, razón por lo que se todos los elementos seleccionados cumplen satisfactoriamente las necesidades de este proyecto. En el anexo 9 se detallan los planes de mantenimiento, mientras que en el anexo 11 se detallan los planos de fabricación y montaje.

CAPÍTULO 4

En el presente capítulo se selecciona los elementos de control del sistema de corte, se identifica el esquema general del lazo de control a aplicarse en cada eje, posteriormente se realiza el diagrama de conexiones del sistema de control. Una vez definido el sistema de control, se presentan las configuraciones de pines en el puerto paralelo para la comunicación entre el computador y el sistema de control, también se calcula los parámetros para la interpretación de señales entre el programa de control en el computador y el sistema de control.

4.1. SISTEMA DE CONTROL

El funcionamiento del sistema de control depende del funcionamiento del sistema mecánico; para lograr que estos sistemas funcionen se debe ingresar datos numéricos o de calibración al software de control, tales datos deben ser calculados en relación a las dimensiones de elementos mecánicos que conforman el par de movimiento de los tres ejes. Los componentes del sistema CNC, se dividen en: la interfaz hombre – máquina (MMI), el núcleo del control numérico (NCK), y la unidad lógica programable (PLC) o controlador del motor, tales componentes se describen en el capítulo 1.

4.2. SENSORES Y ACTUADORES

Los sensores son los que detectan el estado o posición de los elementos en movimiento según los parámetros programados, estos indican a los actuadores la acción que han de efectuar, según el lazo de control adaptado al sistema. Para el sistema de corte mediante plasma, los sensores son ubicados a los extremos de cada eje con el objetivo de indicar a al programa de control que ha concluido la carrera en determinado eje. En el caso de ocurrir alguna emergencia también existe un sensor llamado paro de emergencia. El tipo de accionamiento es manual y finalmente el sensor para controlar la altura de la antorcha de plasma, que tiene por objetivo mantener una altura constante entre la tobera del plasma y el material a ser cortado, sin importar las variaciones en la altura de la superficie del material. Los actuadores seleccionados son motores de pasos para cada eje.

4.2.1. Tipos de sensores para fines de carrera

Los sensores utilizados frecuentemente para indicar que se ha llegado al final del recorrido de movimiento, son los sensores de proximidad inductivos, que consiste en la alteración del campo magnético con lo que se obtienen señales digitales, este sensor es mostrado en la figura 4.1. Otro tipo es el sensor óptico, el cual consiste en un haz de luz proyectado, al ser interrumpido este haz se entrega una señal digital; en la figura 4.2 se muestra este tipo de sensor. Por último el interruptor de final de carrera, que consiste en cortar o dar flujo eléctrico, y es conocido como pulsadores normalmente abiertos o normalmente cerrados. En las figura 4.3 y 4.4, se muestra el interruptor final de carrera y paro de emergencia respectivamente.



Figura 4.1. Sensor de proximidad inductivo (55).

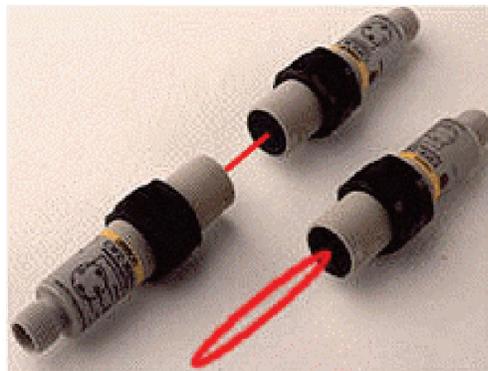


Figura 4.2. Sensor óptico (56).



Figura 4.3. Interruptor final de carrera (57).



Figura 4.4. Interruptor de paro de emergencia (58).

4.2.2. Selección de sensores para fines de carrera

La selección de sensores para fines de carrera y paro de emergencia, se realiza por el método de la matriz de decisión ponderada. En la figura 4.5 y tabla 4.1 se muestra el árbol objetivo y la matriz ponderada para la selección de sensores respectivamente, los criterios de selección que describen a continuación:

- Facilidad de montaje y desmontaje.- Consiste en el grado de complejidad para montar el sensor desde el punto de vista mecánico y eléctrico.
- Facilidad de mantenimiento.- Consiste en el grado de complejidad para dar mantenimiento desde el punto de vista mecánico y eléctrico.
- Valor económico.- Se define como el costo del elemento.
- Vida útil.- Es la característica que define la durabilidad del elemento ante los ciclos de carga.

- Capacidad de respuesta.- Se define como la velocidad con que entrega la señal al sistema.

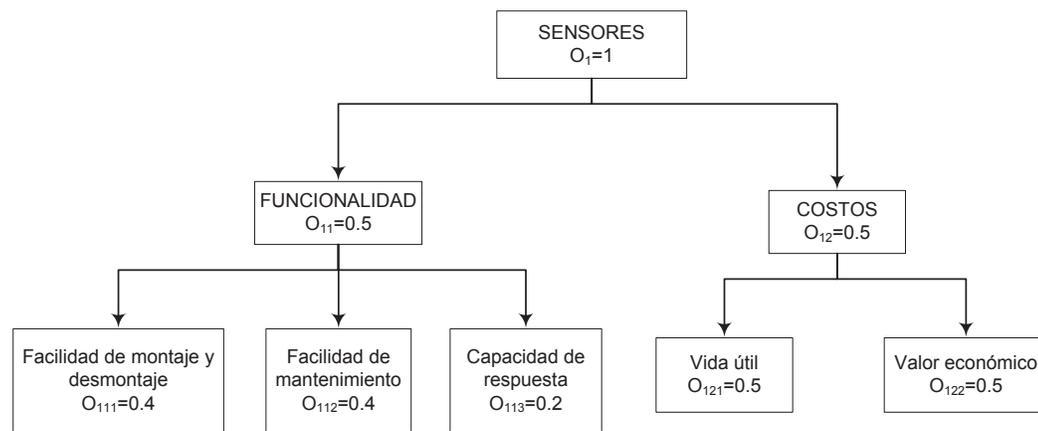


Figura 4.5. Árbol objetivo para la selección de sensor.

Tabla 4.1. Matriz ponderada para la selección de sensor.

MATRIZ DE DECISIÓN PONDERADA PARA LA SELECCIÓN DE SENSORES							
Criterio de diseño	Factor de Peso	Sensor óptico		Sensor inductivo		Interruptor fin de carrera	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de montaje y desmontaje	0.20	6	1.20	6	1.20	9	1.80
Facilidad de	0.20	7	1.40	7	1.40	9	1.80
Capacidad de respuesta	0.10	9	0.90	9	0.90	7	0.70
Vida útil	0.25	9	2.25	8	2.00	7	1.75
Valor económico	0.25	7	1.75	6	1.50	9	2.25
		Σ	7.50	Σ	7.00	Σ	8.30

Según los resultados obtenidos, los sensores que se utilizarán para fines de carrera y paro de emergencia son interruptores de final de carrera, por su facilidad de montaje mecánico - eléctrico y bajo costo. Para evitar varias vías de cables que den la señal de fin de carrera o paro de emergencia se utilizarán los interruptores normalmente cerrados conectados en serie.

4.2.3. Actuadores

Los actuadores para este caso son los motores de paso para cada eje de movimiento, los cuales realizan el movimiento de acuerdo a las señales enviadas por el programa de control por medio del puerto paralelo del computador. En la tabla 4.2 se muestran las características técnicas para los motores de cada eje,

mientras que la figura 4.6 se muestran los motores seleccionados en el capítulo 3. Las señales que los motores necesitan para el funcionamiento son:

Señal de paso (Step o PUL).- Para cada paso de giro del rotor del motor, el programa de control debe enviar una señal de 1 lógico, dirigido al controlador del motor.

Señal de dirección (DIR).- Esta señal indica el sentido de giro del rotor del motor, la cual debe ser enviada antes de la señal de paso.

Señal de habilitación (ENB).- Esta señal sirve para habilitar el control del motor, es decir que si no se está ejecutando algún programa, los motores permanecen inactivos.

Tabla 4.2. Datos técnicos de actuadores o motores de paso.

Eje	X	Y	Z
Longitud [mm]	201	151	115
Torque [N m]	29	11	3
Angulo de paso	1.8°	1.8°	1.8°
Peso [kg]	11.7	5	1.55
Corriente nominal [A]	8	3.5	3
Tensión de funcionamiento [V]	60	60	30
Resistencia de fase [Ω]	0.7	1.9	2.1
Inercia del rotor [kg cm^2]	1.62	3.6	0.89

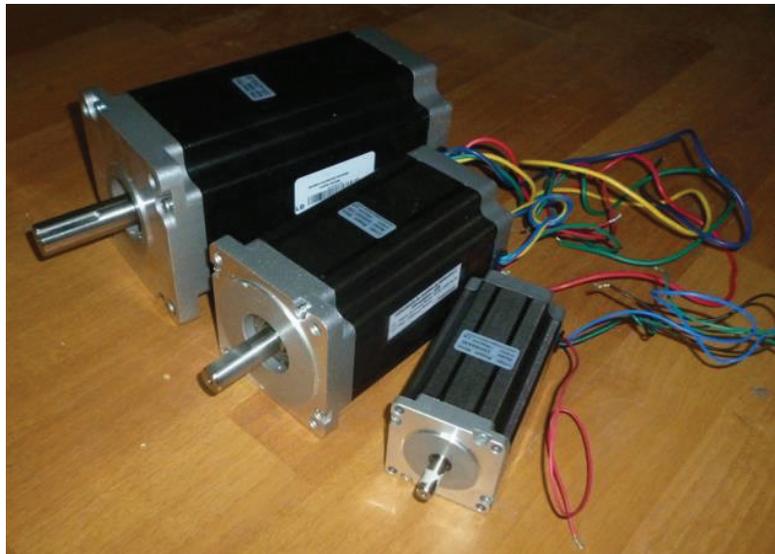


Figura 4.6. Actuadores o motores de paso a utilizarse.

4.3. SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

El funcionamiento de motores de paso es por la frecuencia de pulsos enviados por el controlador, los cuales definen la velocidad de giro del rotor de motor, el lazo de control es mostrado en la figura 4.7. Este tipo de control es en lazo abierto para los ejes X e Y; mientras que para el eje Z, es en lazo cerrado. La precisión también depende del sistema de transmisión y de los motores de paso.

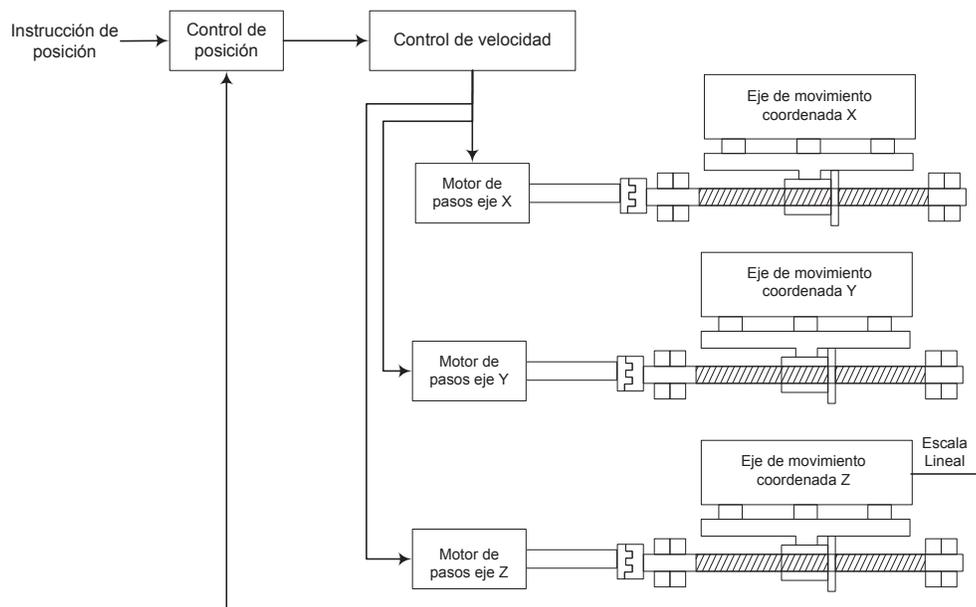


Figura 4.7. Lazos de control aplicado al sistema de control de movimiento para el corte automático de planchas mediante antorcha de plasma.

4.3.1. Tarjeta de interfaz de control

La función de la tarjeta de interfaz de control, es acondicionar las señales tanto de entradas como de salidas, a un nivel de voltaje adecuado, permite la comunicación entre uno o más aparatos conectados a un computador, asegurar la compatibilidad entre el computador y los elementos a ser controlados, guía las señales de entrada y salida por el puerto designado desde y hacia el computador, permite una adecuada provisión de energía a los elementos de a ser controlados. Existen varias tarjetas de interfaz pero solo se analiza dos de ellas, puesto que estas poseen una característica principal: la compatibilidad con el programa MACH3.

4.3.1.1. Tarjeta de interfaz de control universal

En la figura 4.8, se indica la fotografía de la tarjeta de interfaz de control universal.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Compatibilidad con el programa de control MACH3
- Transmisión de datos por medio del puerto paralelo del computador
- Capacidad de control de 4 ejes
- Alimentación de energía de 12 VDC
- Requiere de archivo ccc_ubob.dll para el funcionamiento
- Provee 16 salidas digitales
- Provee 9 entradas digitales

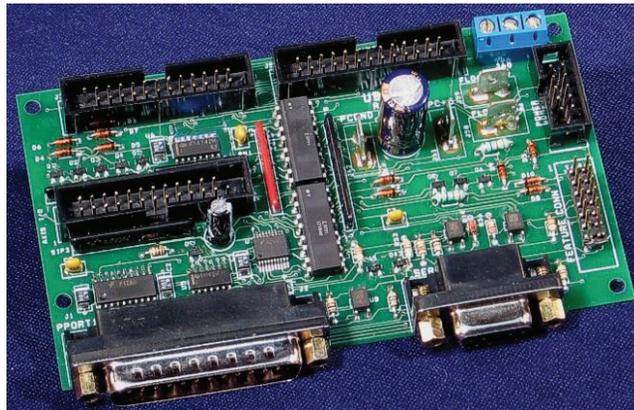


Figura 4.8. Tarjeta de interfaz de control universal (CandCNC UBOB III) (59).

4.3.1.2. Tarjeta de interfaz de control DB25-1205

En la figura 4.9, se indica la fotografía de la tarjeta de interfaz de control DB25-1205, las características técnicas son las siguientes:

- Capacidad de control de 6 ejes.
- Compatibilidad con el programa de control MACH3.
- Transmisión de datos por medio del puerto paralelo del computador.
- Alimentación de energía de 5 VDC.
- No requiere de la instalación de controladores internos en el computador.
- Provee 12 salidas digitales.
- Provee 5 entradas digitales.
- P2 y P3, son designadas para el eje X.
- P4 y P5, son designadas para el eje Y.

- P6 y P7, son designadas para el eje Z.



Figura 4.9. Tarjeta de interfaz de control (DB25-1205) (60).

4.3.1.3. Selección de la tarjeta de control

Según las características descritas en los párrafos 4.2.1.1 y 4.2.1.2, las dos tarjetas cumplen satisfactoriamente, a pesar de tener diferencia en algunas de sus características; la diferencia en costos hace que la tarjeta de interfaz DB25-1205, sea la seleccionada, puesto que es inferior al costo de la tarjeta UBOB III. En la figura 4.10 se identifica los pines de entrada, salida y alimentación de voltaje.

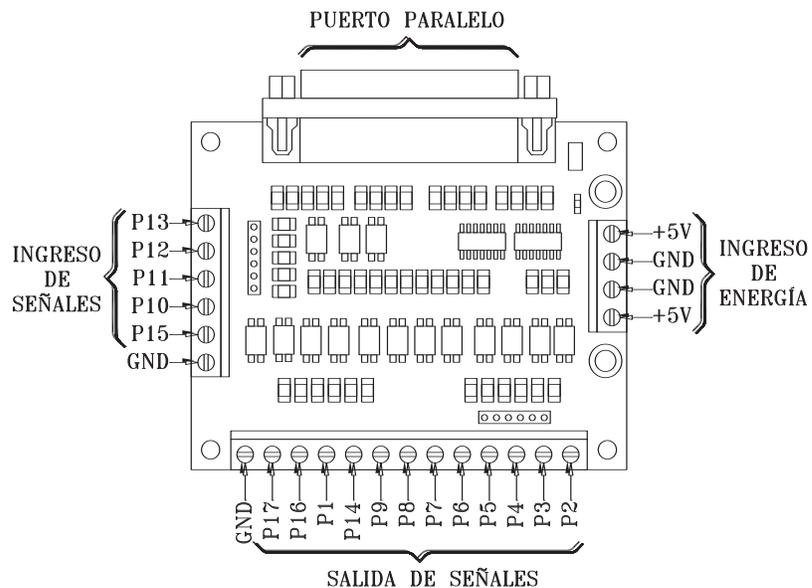


Figura 4.10. Tarjeta de interfaz de control (DB25-1205), identificación de pines.

4.3.2. *Control de altura de la antorcha*

El control de altura de la antorcha de plasma tiene por objetivo mantener la antorcha de plasma a una altura adecuada, este valor deberá ser proporcionado en los datos del programa; al surgir una variación en la superficie del material a ser cortado, este control debe actuar automáticamente subiendo o bajando la antorcha. En la figura 4.11, se muestra un ejemplo de la manera de trabajar el control de altura.



Figura 4.11. Control de altura de la antorcha de plasma trabajando (42).

- *Selección del control de altura de antorcha*

Los controles de altura de la antorcha a analizar son: CandCNC DTHC IV y el THC Compacto 150, los cuales son mostrados en las figuras 4.12 y 4.13, respectivamente. En la figura 4.14 se muestra el árbol objetivo de los criterios de selección y en la tabla 4.3 se muestran los valores de ponderación para la selección del control de altura, el cual indica que el THC Compacto 150, es el elemento seleccionado. El método de evaluación es el matriz de decisión ponderada, los criterios de selección se describen a continuación:

- **Facilidad de montaje.**- Consiste en el grado de complejidad para instalar el control desde el punto de vista eléctrico
- **Facilidad de mantenimiento.**- Consiste en el grado de complejidad para realizar el mantenimiento desde el punto de vista eléctrico
- **Complejidad en configuración.**- Consiste en la facilidad de configurar los parámetros para el funcionamiento

- Valor económico.- Se define como el costo del elemento

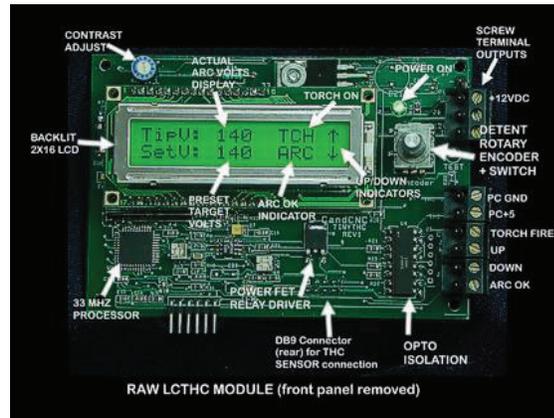


Figura 4.12. Control de altura de la antorcha CandCNC DTHC IV (61).



Figura 4.13. Control de altura de la antorcha THC Compacto 150 (62).

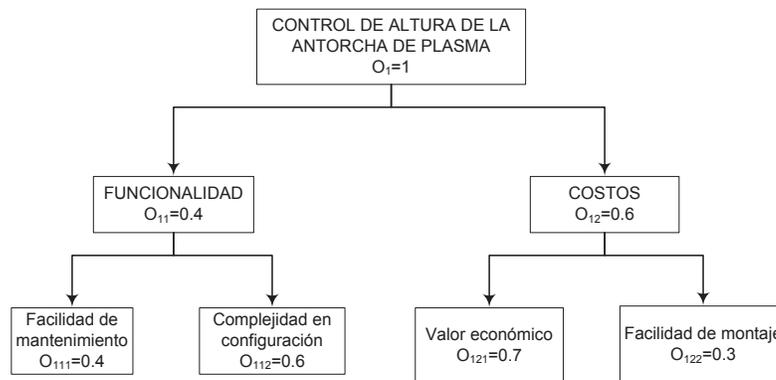


Figura 4.14. Árbol objetivo para la selección del control de altura de la antorcha.

Tabla 4.3. Matriz ponderada para la selección del control de altura de la antorcha.

Criterio de diseño	Factor de Peso	Control CandCNC DTHC IV		THC Compacto 150	
		Puntuación	Categorización	Puntuación	Categorización
Facilidad de mantenimiento	0.16	7	1.12	8	1.28
Complejidad en configuración	0.24	6	1.44	9	2.16
Valor económico	0.42	7	2.94	8	3.36
Facilidad de montaje	0.18	7	1.26	9	1.62
		Σ	6.76	Σ	8.42

4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez definidos los elementos que conformaran el sistema de control de movimiento de la antorcha de plasma, se debe indicar las conexiones necesarias entre los elementos de control, según la figura 4.7. El esquema de conexiones se muestra en el anexo 7.

4.5. CONFIGURACIÓN EN EL PROGRAMA DE CONTROL

De acuerdo a las especificaciones definidas, el programa de control a utilizarse es el MACH3. Este programa se usará para transmitir las señales de control por medio del puerto paralelo del computador. Para esto, es necesario designar los pines del puerto para el funcionamiento coordinado de cada motor. Según la tarjeta de interfaz de figura 4.10, se identifica los pines para cada motor y entradas para los interruptores fines de carrera, paro de emergencia y el control de altura de la antorcha. En las figuras 4.15 a 4.20, se asigna los pines del puerto paralelo de acuerdo al anexo 7. En el menú Config: Ports and Pins, se indica la venta para la asignación de entradas y salidas.

Asignación de puerto, en el sub menú Port Setup and Axis Selection.- Para la entrada y salida de señales se utiliza el puerto paralelo del computador, este comúnmente esta designado como 0x378; la velocidad de trabajo de 25000 Hz, es la apropiada para el trabajo con motores de paso, la asignación de puerto y velocidad se muestra en la figura 4.15.

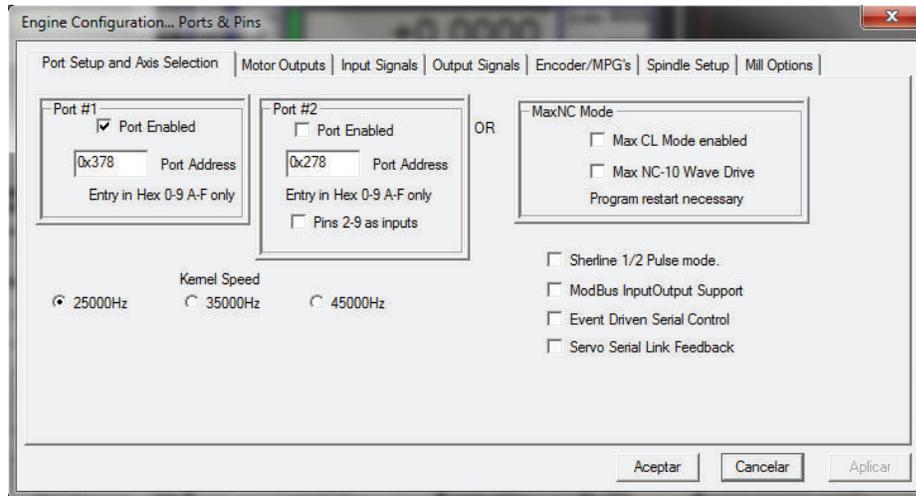


Figura 4.15. Asignación de puerto y velocidad de trabajo.

Salidas de señales a los motores de paso en el sub menú Motor Outputs.- Para que se ejecute determinado trabajo por parte de los motores, se asigna los pines 3 y 2, 5 y 4, 7 y 6, para los ejes X, Y y Z respectivamente. Si el controlador dispone de entradas activas por bajo, las casillas Dir Low Active y Step Low Active deben estar marcadas con el visto de color verde, como se muestra en la figura 4.16.

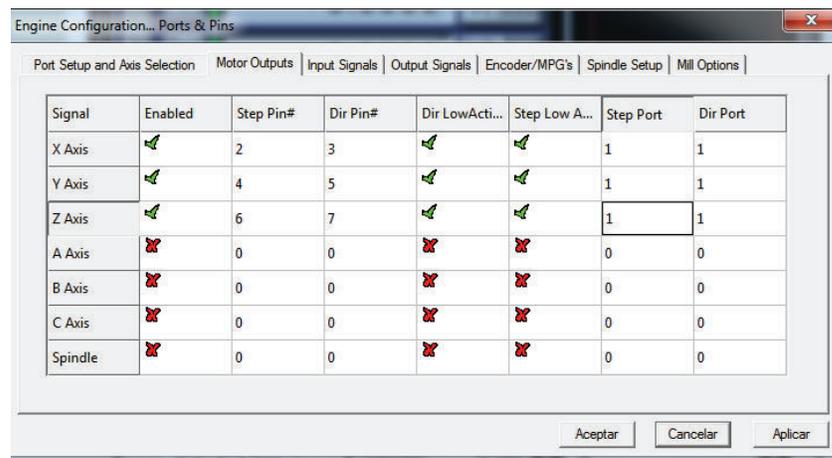


Figura 4.16. Asignación de señales de salida a los motores de paso.

Entrada de señales en el sub menú Input Signals.- Las entradas de señales consisten los interruptores de fines de carrera, paro de emergencia y altura de altura de la antorcha. En la figura 4.17 se muestra la asignación de pines para estas entradas. Debido a que el puerto paralelo solo dispone de

5 entradas, se utiliza la opción “HotKey”, para las entradas de retorno a las coordenadas de origen “Home”, presionando la letra “h” del teclado, carácter asignado como 72. Es decir, al presionar esta tecla los ejes de movimiento retornan a las coordenadas 0, 0, 0, predefinidas. Las entradas de paro de emergencia, encendido, ascenso y descenso de la antorcha de plasma son asignados a los pines 13, 10, 11 y 15 respectivamente, la asignación de estos pines es mostrado en la figura 4.18.

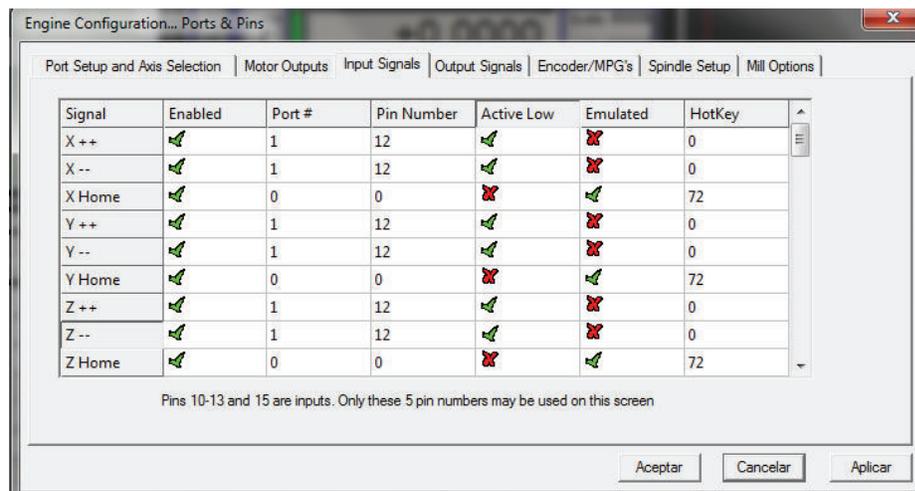


Figura 4.17. Asignación de límites de carrera y retorno a las coordenadas de origen.

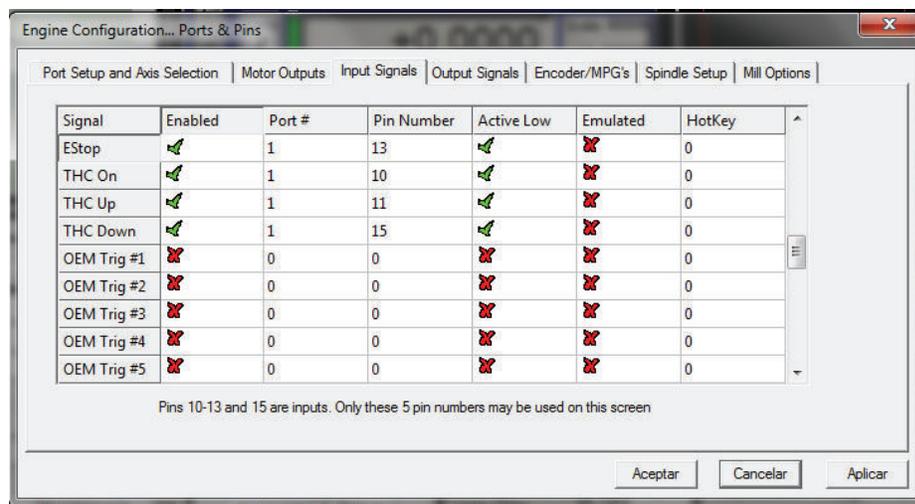


Figura 4.18. Asignación de paro de emergencia y controles de altura de la antorcha.

La función de las salidas “enable” en el sub menú Outputs Signals sirve para indicar a los motores que el programa está activo o ejecutándose. Es decir que cuando no se está dando ninguna orden a los motores estos deben estar inactivos. Para la habilitación de los tres motores solo se utiliza una salida que a su vez se unen entre sí en los controladores de los motores. En la figura 4.19, se indica la asignación de pin de salida para la habilitación de los motores.

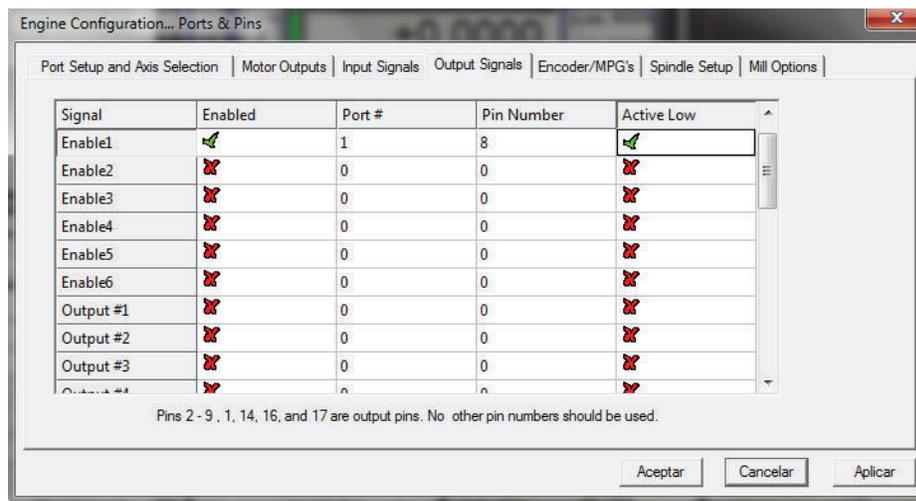


Figura 4.19. Asignación de pin para la habilitación de motores.

Habilitar el control de altura de la antorcha en el sub menú Mill Options.- Para permitir que el dispositivo de control de altura de la antorcha actué en el eje designado, se habilita la opción: Allow THC UP/DOWN Control even if not in THC Mode. En la figura 4.20 se indica la activación de esta opción.

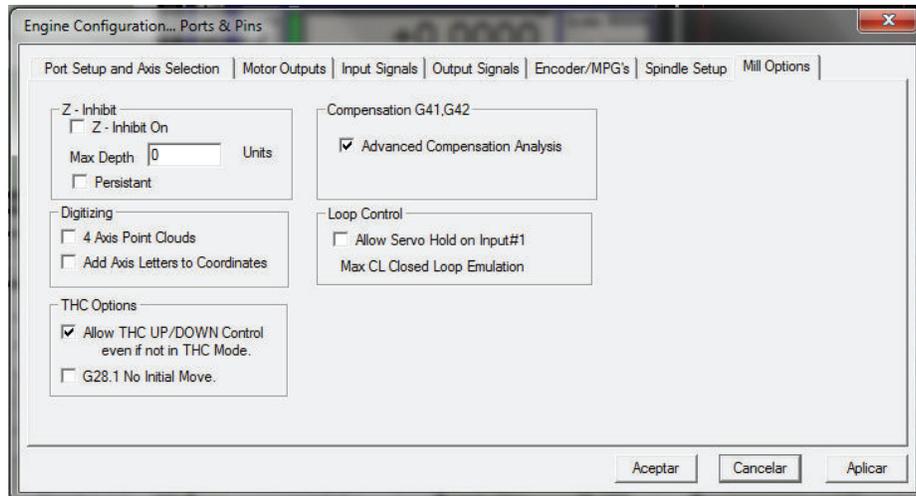


Figura 4.20. Activación del control de altura de la antorcha.

4.6. AFINACIÓN DE MOTORES

Para que el sistema de control trabaje de manera coordinada con el sistema mecánico, se deben dar parámetros funcionamiento al programa de control. Estos deben estar en función de los elementos mecánicos que transforman el movimiento rotatorio en lineal. Antes de la afinación es importante definir las unidades de trabajo. En el menú Config: Ports and Pins, Select Native Units, se selecciona las unidades de medida en mm, como se indica en la figura 4.21.

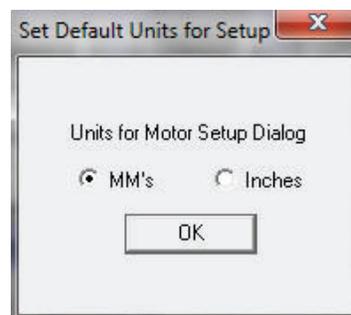


Figura 4.21. Selección de unidades de trabajo.

Los motores tienen un ángulo de giro por cada paso de 1.8° (resolución), es decir que tienen 200 pasos por cada revolución. Sin embrago se pueden dividir en micro-pasos, tal configuración del controlador y de acuerdo a la resolución seleccionada. Para el ingreso de datos de movimiento de motores se tiene menú Config, Motor Tuning, el cual es mostrado en la figura 4.22. La velocidad de

movimiento es la máxima que se moverá el eje y variará la velocidad de acuerdo al dato en codificación de determinada pieza. La aceleración es la calculada en el capítulo 3. Los controladores a utilizarse se muestran en la figura 4.23. En las tablas 4.5 a 4.10 se definen las posiciones de micro interruptores que definen los parámetros de corriente y velocidad para cada eje.

Tabla 4.4. Cálculo de parámetros para configuración en el programa MACH3.

Datos		Ecuación		Resultado
Numero de dientes de la rueda eje X (paso diametral 10)	$n = 51$	Pasos por revolución en MACH3 para el eje X	$PRM3 = \frac{R}{n * p}$ (63 págs. 57-58)	$PRM3 = 9.829725 \frac{\text{Pasos}}{\text{mm}}$
Paso de la rueda eje X	$p = 7.979 \text{ mm}$ (37 pág. 328)			
Resolución del motor	$R = 4000 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			
Numero de dientes de la rueda eje Y (paso diametral 14)	$n = 47$	Pasos por revolución en MACH3 para el eje Y	$PRM3 = \frac{R}{n * p}$ (63 págs. 57-58)	$PRM3 = 18.663681 \frac{\text{Pasos}}{\text{mm}}$
Paso de la rueda eje Y	$p = 5.7 \text{ mm}$ (37 pág. 328)			
Resolución del motor	$R = 5000 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			
Paso del tornillo rosca cuadrada eje Z	$p = 5.08 \text{ mm}$	Pasos por revolución en MACH3 para el eje Z	$PRM3 = \frac{R}{p}$ (63 págs. 57-58)	$PRM3 = 78.740158 \frac{\text{Pasos}}{\text{mm}}$
Resolución del motor	$R = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$			

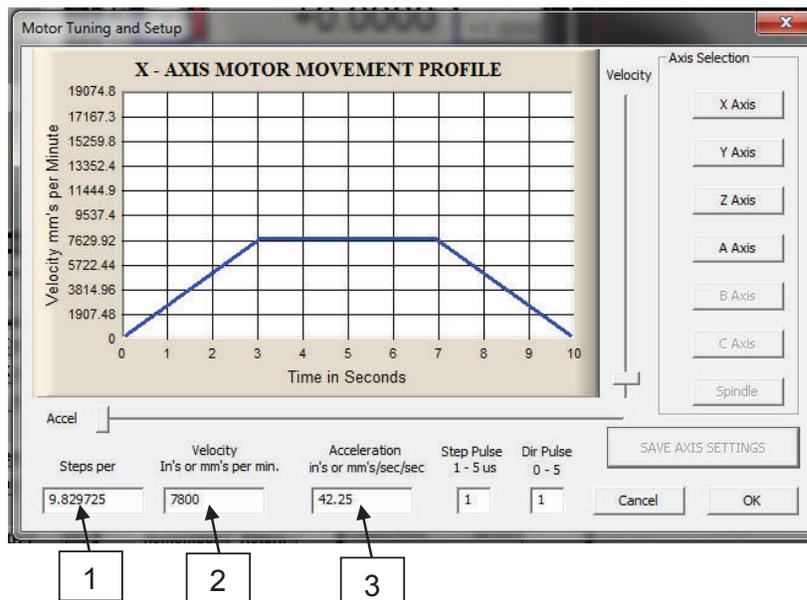


Figura 4.22. Ingreso de datos para el movimiento del eje X. 1) Pasos/mm, 2) Velocidad máxima correspondiente a 130 mm/s, 3) Aceleración de movimiento calculado en el capítulo 3.

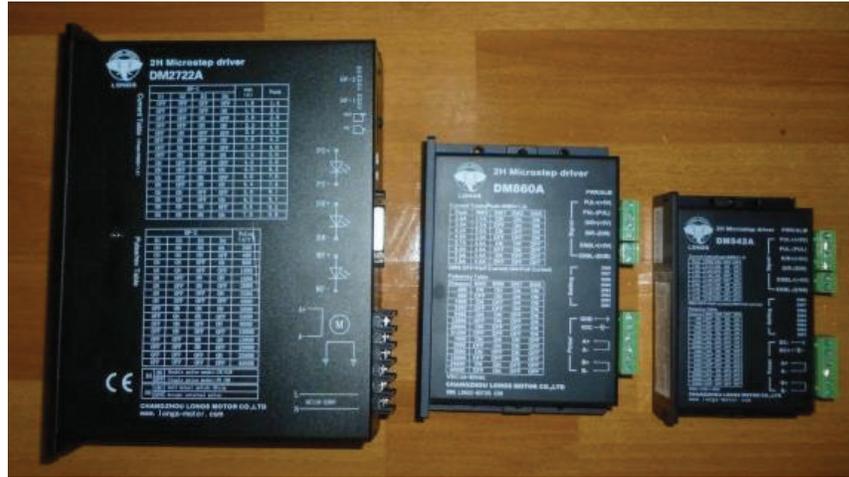


Figura 4.23. Controladores de los motores de paso para los ejes X, Y y Z.

Tabla 4.5. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM542A, correspondiente al eje Z.

TABLA DE CORRIENTE				
Pico	RMS	SW1	SW2	SW3
1.00	0.71	ON	ON	ON
1.46	1.04	OFF	ON	ON
1.92	1.36	ON	OFF	ON
2.37	1.69	OFF	OFF	ON
2.84	2.03	ON	ON	OFF
3.32	2.36	OFF	ON	OFF
3.76	2.69	ON	OFF	OFF
4.20	3.00	OFF	OFF	OFF
SW4: ON				

Tabla 4.6. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM542A, correspondiente al eje Z.

TABLA: PULSOS/REV				
Pulso/rev	SW5	SW6	SW7	SW8
400	OFF	ON	ON	ON
800	ON	OFF	ON	ON
1600	OFF	OFF	ON	ON
3200	ON	ON	OFF	ON
6400	OFF	ON	OFF	ON
12800	ON	OFF	OFF	ON
25600	OFF	OFF	OFF	ON
1000	ON	ON	ON	OFF
2000	OFF	ON	ON	OFF
4000	ON	OFF	ON	OFF
5000	OFF	OFF	ON	OFF
8000	ON	ON	OFF	OFF
10000	OFF	ON	OFF	OFF
20000	ON	OFF	OFF	OFF
25000	OFF	OFF	OFF	OFF

Tabla 4.7. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM860A, correspondiente al eje Y.

TABLA DE CORRIENTE				
Pico	RMS	SW1	SW2	SW3
2.8	2.0	ON	ON	ON
3.5	2.5	OFF	ON	ON
4.2	3.0	ON	OFF	ON
4.9	3.5	OFF	OFF	ON
5.7	4.0	ON	ON	OFF
6.4	4.6	OFF	ON	OFF
7.0	5.0	ON	OFF	OFF
7.8	5.6	OFF	OFF	OFF
SW4: ON				

Tabla 4.8. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM860A, correspondiente al eje Y.

TABLA: PULSOS/REV				
Pulso/rev	SW5	SW6	SW7	SW8
400	ON	ON	ON	ON
800	OFF	ON	ON	ON
1600	ON	OFF	ON	ON
3200	OFF	OFF	ON	ON
6400	ON	ON	OFF	ON
12800	OFF	ON	OFF	ON
25600	ON	OFF	OFF	ON
51200	OFF	OFF	OFF	ON
1000	ON	ON	ON	OFF
2000	OFF	ON	ON	OFF
5000	ON	OFF	ON	OFF
10000	OFF	OFF	ON	OFF
25000	ON	ON	OFF	OFF
50000	OFF	ON	OFF	OFF

Tabla 4.9. Posiciones de micro interruptores de corriente en el controlador DM2722A, correspondiente al eje X.

TABLA: CORRIENTE					
DP-1				RMS [A]	PICO
D1	D2	D3	D4		
OFF	OFF	OFF	OFF	1.0	1.4
OFF	OFF	OFF	ON	1.5	2.1
OFF	OFF	ON	OFF	2.0	2.8
OFF	OFF	ON	ON	2.3	3.2
OFF	ON	OFF	OFF	2.5	3.5
OFF	ON	OFF	ON	3.0	4.2
OFF	ON	ON	OFF	3.3	4.6
OFF	ON	ON	ON	3.6	5.0
ON	OFF	OFF	OFF	4.0	5.6
ON	OFF	OFF	ON	4.5	6.3
ON	OFF	ON	OFF	5.0	7.0
ON	OFF	ON	ON	5.4	7.6
ON	ON	OFF	OFF	5.8	8.1
ON	ON	OFF	ON	6.2	8.7
ON	ON	ON	OFF	6.6	9.2
ON	ON	ON	ON	7.0	9.8

Tabla 4.10. Posiciones de micro interruptores de velocidad en el controlador DM2722A, correspondiente al eje X.

DP-2				Pulso (s/r)
D1	D2	D3	D4	
ON	ON	ON	ON	200
ON	ON	ON	OFF	400
ON	ON	OFF	ON	800
ON	ON	OFF	OFF	1000
ON	OFF	ON	ON	1600
ON	OFF	ON	OFF	2000
ON	OFF	OFF	ON	3200
ON	OFF	OFF	OFF	4000
OFF	ON	ON	ON	5000
OFF	ON	ON	OFF	6400
OFF	ON	OFF	ON	8000
OFF	ON	OFF	OFF	10000
OFF	OFF	ON	ON	12800
OFF	OFF	ON	OFF	20000
OFF	OFF	OFF	ON	25600
OFF	OFF	OFF	OFF	40000
D5	ON	Doble pulso: CW/CCW		
	OFF	Pulso simple: PU/DR		
D6	ON	Auto detección: 30r/m		
	OFF	Ingreso de pulso externo		

El procedimiento para la ejecución de un programa para determinada pieza se indica en el anexo 10.

CAPÍTULO 5

En el presente capítulo se detalla la construcción y preparación de las partes que conforman la mesa de corte: estructura de soporte, sistema mecánico de movimiento, acople de la antorcha y ensamble de las partes asociadas al sistema de corte mediante plasma; también se realiza el montaje electrónico, pruebas de calibración del equipo. Posterior a los trabajos indicados se obtuvo la máquina con el sistema de control y se evaluó su funcionamiento, detectando las restricciones del equipo, el cual tiene la capacidad de cortar muescas mayores a 5 mm, y diámetros mayores o iguales a 60 mm, en velocidades comprendidas de entre 8 a 130 mm/s

5.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO Y MONTAJE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

La construcción del sistema mecánico, consiste en la parte estática o estructura soporte y en la parte dinámica o sistema de transmisión de movimiento. La estructura soporte debe estar nivelada para conseguir el montaje óptimo de los elementos mecánicos, los cuales también debe nivelados y alineados adecuadamente, esto asegura la facilidad de movimiento entre los elementos de transmisión de movimiento. Una vez montado todos los elementos, se realiza la prueba manual del funcionamiento de los ejes X, Y y Z, antes de conectar la parte de control de la máquina. En la figura 5.1, se indica el proceso general para la construcción de la mesa de corte.

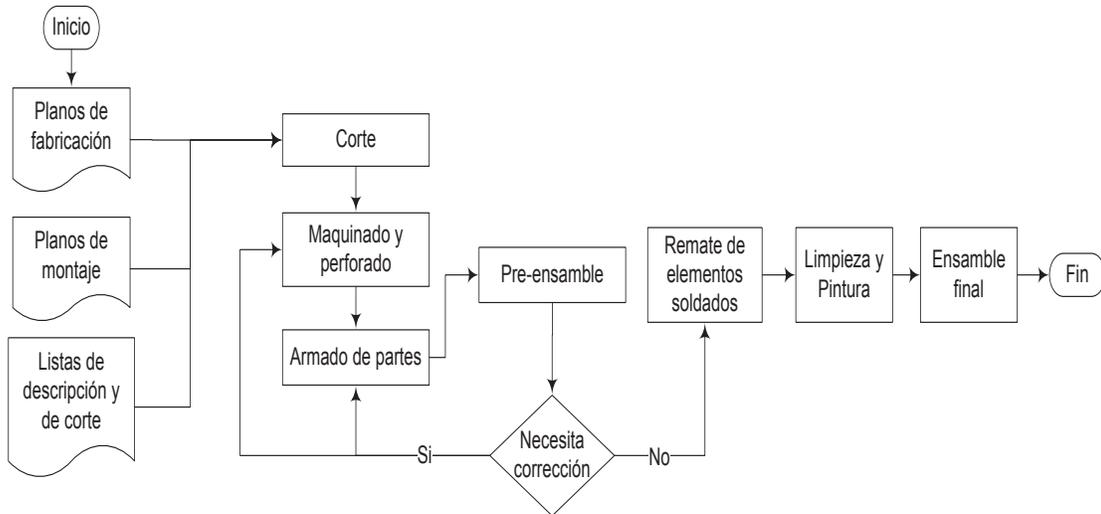


Figura 5.1. Proceso para la construcción de la estructura soporte.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA SOPORTE

La estructura soporte es la parte estática de la mesa de corte, tal estructura posee pernos para regulación en cada apoyo, con el objetivo de nivelar la estructura; la descripción de partes que conforman la estructura se indica en la figura 3.42 del capítulo 3 y en la tabla 5.1, se indican las operaciones de fabricación. El proceso constructivo de la estructura se describe en el diagrama de proceso de construcción de la figura 5.1. En las figuras 5.2 a 5.22, se muestra el proceso de construcción.

Tabla 5.1. Operaciones de fabricación de elementos de la estructura.

ELEMENTO	OPERACIONES			
	Cortado	Perforado	Soldado	Roscado
Base de anclaje	√	√	√	
Columnas	√	√	√	
Vigas longitudinales principales	√	√	√	√
Vigas longitudinales secundarias	√	√	√	
Vigas transversales	√	√	√	

El proceso de fabricación de la mesa de corte inicia de la siguiente manera:

- Trazado de dimensiones en los perfiles HEB 140 y en la IPE 120, pletinas 2-1/2", UPN 180, según dimensiones, tolerancia y tipo de acabado superficial del perfil y se muestra en la figura 5.2.



Figura 5.2. Trazo para corte de elementos.

- Con los perfiles estructurales cortados con la dimensión requerida se procede al trazado de los agujeros y perforaciones, para el proceso de perforado se usa una fresadora y un taladro de pedestal que posea una bancada móvil, con lo cual garantizamos una mayor exactitud en las medidas, como se muestra en la figura 5.3. y 5.4

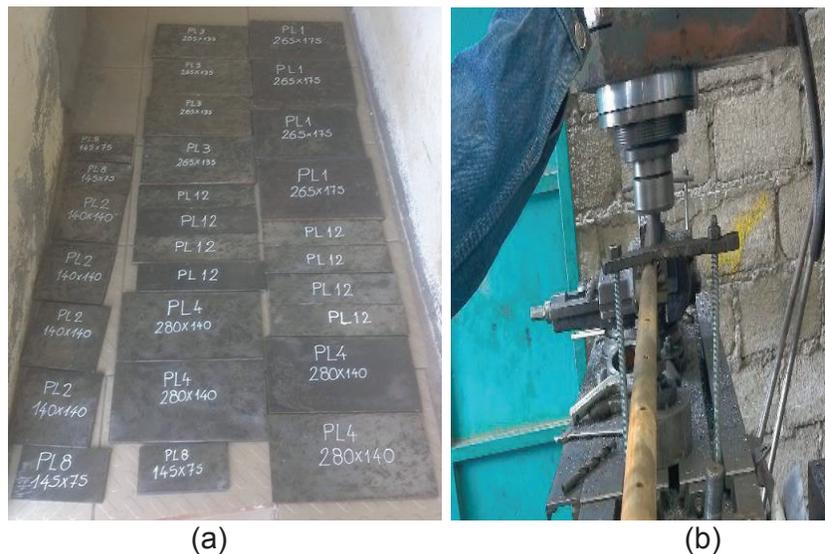


Figura 5.3. Maquinado de elementos, guías y placas mediante fresadora.
a) Placas de apoyos de la mesa, b) perforado de guías eje X - X



Figura 5.4. Placas perforadas mediante fresadora

- Para el armado de bases de nivelación de la mesa se verifica perpendicularidad entre perfiles, se coloca refuerzos y se procede a soldar, se verifica paralelismo y perpendicularidad después de la soldadura, como se muestra en la figura 5.5.



Figura 5.5. Armado de bases de nivelación de mesa.

Terminado el elemento de soporte centramos la columna perfil HEB en cada uno de los cuatro soportes de nivelación esta parte es muy importante garantizar la correcta colocación de los centros tanto de las vigas HEB como del soporte de nivelación, y garantizar la perpendicularidad entre elementos, como se muestra en la figura 5.6.

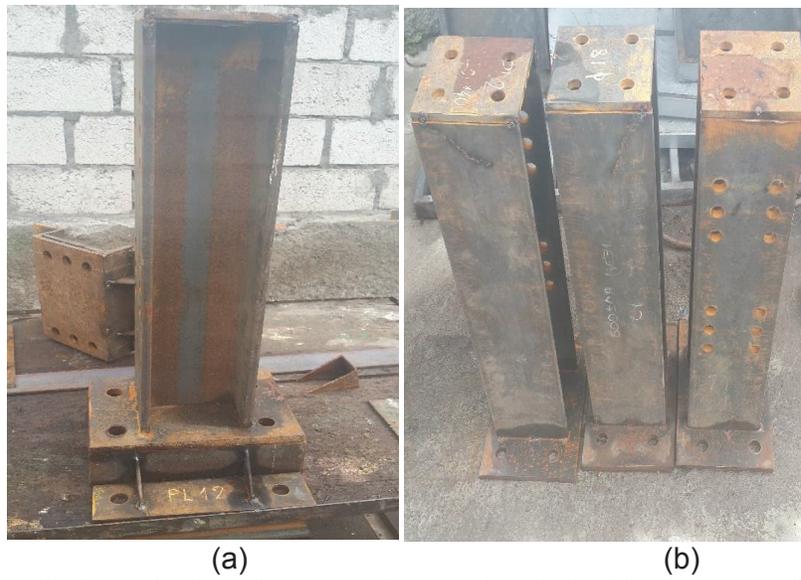


Figura 5.6. Armado de columnas y bases de nivelación de mesa de corte.
a) Armado de columnas, b) Ensamble columnas con bases niveladoras.

- Se revisa que los elementos de soporte cumplan con las dimensiones dadas y se procede al remate de la estructura.
- Se ensambla los soportes de la mesa como se muestra.
- Después se procede con el armado de los tubos con las placas y conformación de la viga de soporte del tanque de agua y cama de platinas, que a la vez son los elementos de unión entre columnas de la mesa.
- Se monta las vigas HEB en sentido longitudinal sobre las columnas, se aperturan los elementos, después se colocan las vigas compuestas por tubos, se revisa que los agujeros y placas coincidan.
- Se montan las guías previamente maquinados y perforados según los planos de construcción sobre las vigas HEB, se procede con la nivelación y alineación y se verifica que el correcto desplazamiento del carro longitudinal, lo mismo se hace con la alineación del mecanismo transversal, debemos garantizar paralelismo y coincidencia entre caras se observa en la figura 5.7. y figura 5.8.



Figura 5.7. Alineación y nivelación de estructura fija de la mesa de corte.



(a)

(b)

Figura 5.8. Alineación de guías eje X-X.

a) Alineación de guía manera manual, b) Verificación visual de alineación.

5.3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y CONTROL DE AVANCE DE LA ANTORCHA.

- Se corta los dientes de las cremalleras para el piñón 1 cuyos datos son: número de dientes 51, ángulo de presión 14.5° y ancho de cara 28 para el eje X-X, para el piñón 2 rueda dentada paso diametral 14 número de dientes 47 ángulo de presión $14,5^\circ$ ancho de cara 20 para el eje Y-Y, se muestra en la figura 5.9.

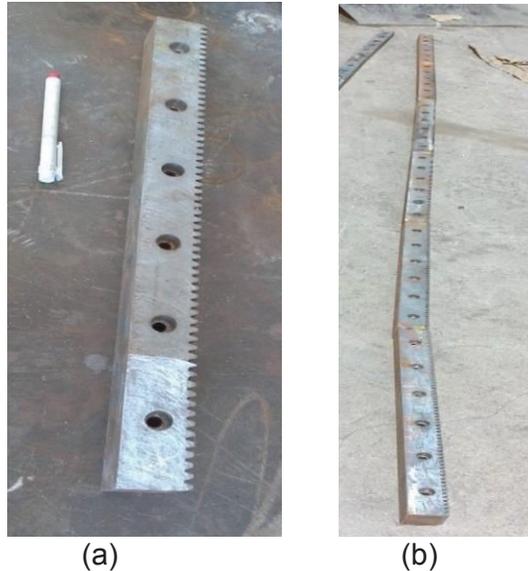


Figura 5.9. Cremalleras maquinadas para los ejes X-X y para ejes Y-Y.
a) Cremallera independiente eje X-X, b) Conjunto cremallera ejes X-X, Y-Y

- Se fabrica los soportes de la viga transversal eje Y-Y, el cual consiste en la estructura de soporte y de las ruedas que van montadas sobre esta y a la vez sobre la guía del eje X-X previamente alineada, tal como se observa en la figura 5.10.

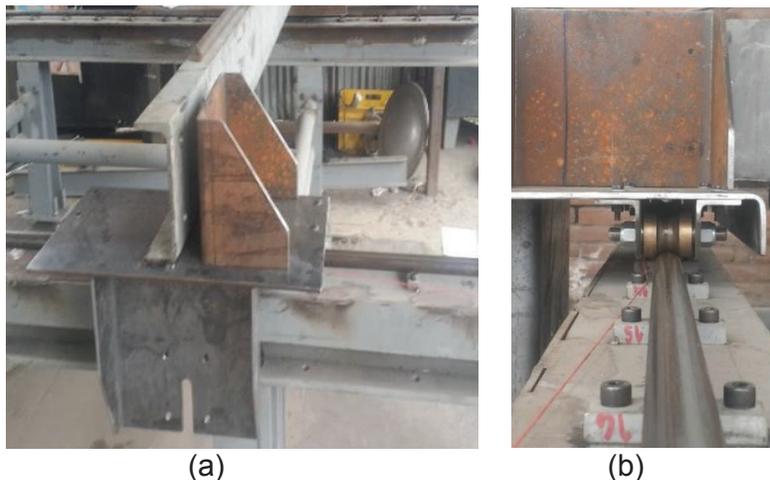


Figura 5.10. Montaje de estructura para los ejes Y - Y y Z - Z.
(a) Montaje de soporte motor de eje X-X, b) Guía y rueda de carro en el eje X-X

- Se fabrica el coche para soporte de la antorcha con placas que se encuentren paralelas y perpendiculares entre ellas, se une las chumaceras en la parte superior e inferior, se ubica el mecanismo de elevación de la

antorcha, se alinea y se verifica que funcione manualmente, como se muestra en la figura 5.11.

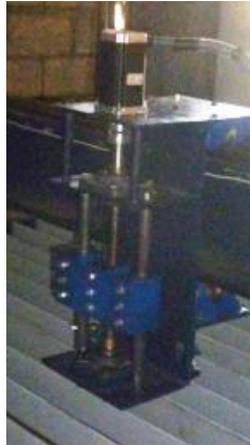


Figura 5.11. Mecanismo de elevación de antorcha, eje Z – Z.

- Se monta las ruedas de las guías inferiores y se coloca sobre el riel de rodadura de la viga de soporte del mecanismo figuras 5.12 (a), (b), (c).

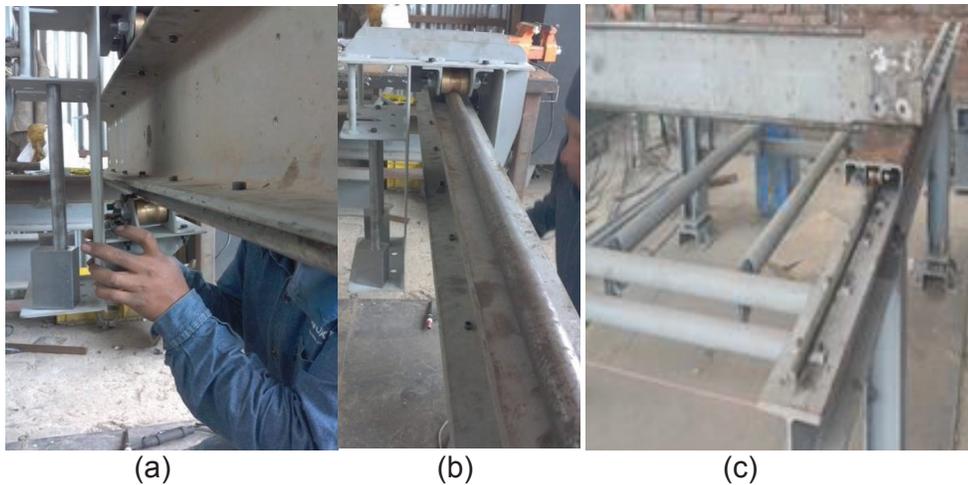


Figura 5.12. Montaje de mecanismo soporte de eje Z – Z.
 a) Armado de ruedas en guías inferiores de soporte de antorcha, b) Prueba de deslizamiento de carro, c) Pruebas de ruedas sobre guías de ejes X-X.

5.4. LIMPIEZA Y PINTURA DE ESTRUCTURA DE SOPORTE

- Realizada las pruebas manuales se desmonta todos los elementos mecánicos y estructurales para limpiar las impurezas, corrosión, entre otros elementos contaminantes; como se indica en la figura 5.13.



Figura 5.13. Limpieza de elementos mesa.

- a) Remoción de escorias, b) Remoción de corrosión por medio de máquina eléctrica manual.

- Una vez limpiado y pulido los elementos se pinta con recubrimiento anticorrosivo como se muestra en la figura 5.14.



Figura 5.14. Protección de material mediante pintura anticorrosiva.

- Se verifica que no exista errores en el fondo anticorrosivo y se pinta la capa superficial, según se indica en la figura 5.15.



Figura 5.15. Acabado final de estructura.

- Por último se revisa los acabados en la superficie de pintura en la estructura, si existe defectos se corrige y se repite el proceso.

5.5. ENSAMBLE FINAL DE PARTES MECÁNICAS Y MOTORES

5.5.1. Montaje de parte mecánicas

- Se ensambla la estructura fija, se nivela y alinea como en los pasos anteriores, se muestra en la figura 5.16.



(a)

(b)

Figura 5.16. Alineación de estructura fija después de pasar el proceso de limpieza y pintado. (a) Vista general, (b) Acercamiento a la base de anclaje

- Se ubica las cremalleras en el sentido longitudinal de la viga, se debe revisar secuencia en las cremalleras para que el paso de los piñones coincida con los de la rueda dentada, de lo contrario habrá problemas de atascamientos por lo tanto problemas de recalentamiento en motores y a futuro daños en el mismo, el montaje de cremalleras se muestra en la figura 5.17.



Figura 5.17. Armado de cremalleras en estructura fija de mesa.

5.5.2. Montaje de motores

- Se ajusta los piñones en los ejes de los motores de traslación X y Y, se monta los motores en las vigas y se revisa que los dientes engranen adecuadamente, como se muestra en la figura 5.18.



Figura 5.18. Acoplamiento de motores en cremalleras de ejes.

- Se monta el motor para el control de la altura de la antorcha, se revisa alineación y se verifica a mano que el mecanismo de subida y bajada la antorcha figura 5.19.



Figura 5.19. Montaje de motor en el eje Z - Z.

- Se coloca las platinas en cada uno de los ángulos previamente preparados y se forma la mesa de soporte de la plancha a cortar, como se aprecia en la figura 5.20.



Figura 5.20. Cama de platinas.

- Se verifica manualmente que todos los elementos funcionen y que no exista atascamientos, si existe algún problemas se revisa la alineación, de ser necesario se arregla la parte o en todo caso reemplazo de la pieza defectuosa.

5.6. SISTEMA ELECTRÓNICO

Para el montaje de fines de carrera, se coloca los sensores tipo palanca o pulsadores normalmente cerrados, en todos los ejes X, Y y Z, cuya función es

desactivar el funcionamiento de los motores y así evitar golpes en los límites extremos de la mesa de corte, como se indica en la figura 5.21.



Figura 5.21. Sensor tipo palanca NC del eje Z – Z.

- Se conecta los cables desde los pulsadores, motores de los ejes X Y y Z, hasta los controladores y tablero de control, se emplea multímetro y se revisa que tanto los motores como los finales de carrera den señales, como se indica en la figura 5.22.

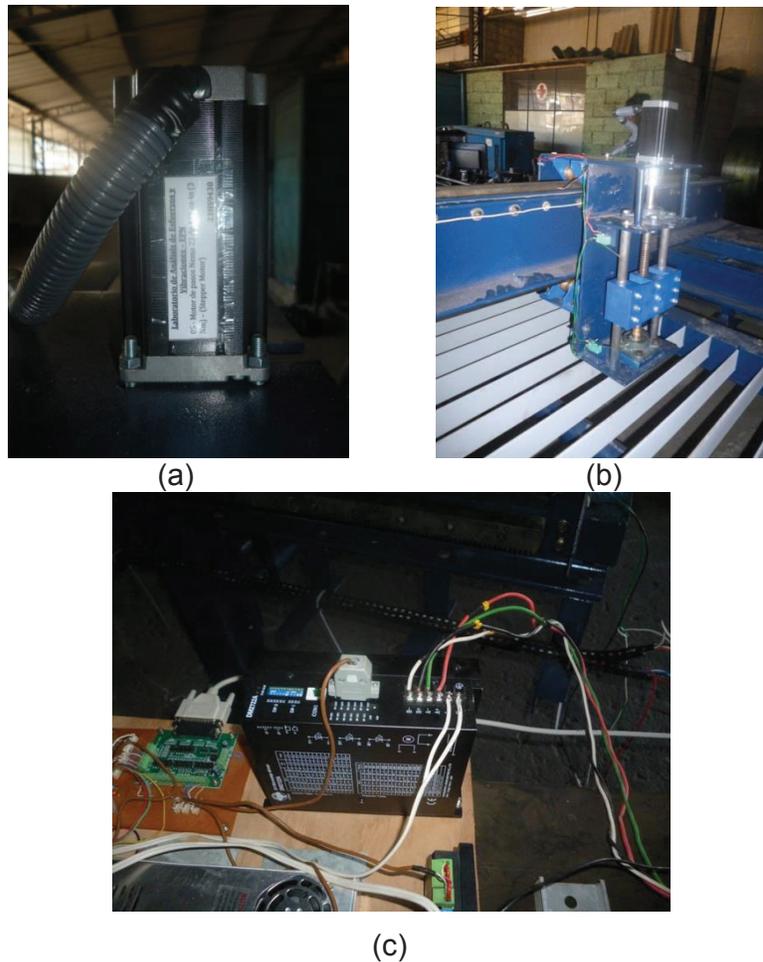


Figura 5.22. Conexión de sistemas eléctricos.
 a) Cableado de motores de eje Z-Z, b) Vista del eje Z, c) Conexión de controlador

- Se conecta y se verifica el funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos.

5.7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

La primera prueba consiste en revisar por separado el desplazamiento de los motores del eje X-X, realizando ordenes de mando desde el computador y verificando una adecuada traslación del mecanismo. Luego se procede con el eje Y-Y con los mismos parámetros y comandado desde el computador, y por último revisamos la subida y bajada del mecanismo del eje Z-Z que es el que se encarga de la antorcha del plasma. El procedimiento de calibración se indica en el anexo 8. Para comprobar el correcto funcionamiento de los mecanismos se verifica los parámetros iniciales con el objetivo de determinar limitaciones en sus

movimientos, en la figura 5.23, se indica la parte a comprobar. Luego de aplicar la codificación se evalúa que en la figura 5.23, la muesca de ancho 2 y 3 mm, no cumple, para el resto de dimensiones verificadas en la figura indica cumple las dimensiones satisfactoriamente para velocidades de 8 a 130 mm/s, tal verificación se muestra en la figura 5.24.

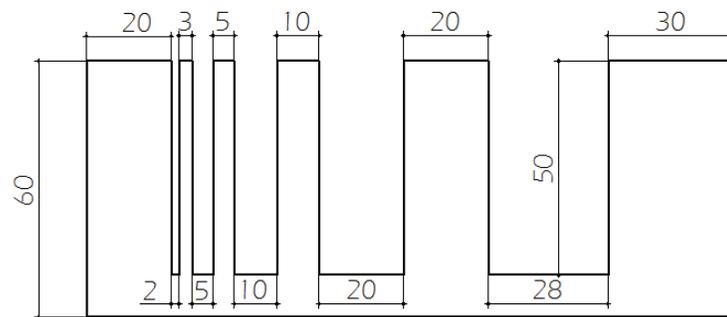


Figura 5.23. Prueba con muescas de diferentes anchos.

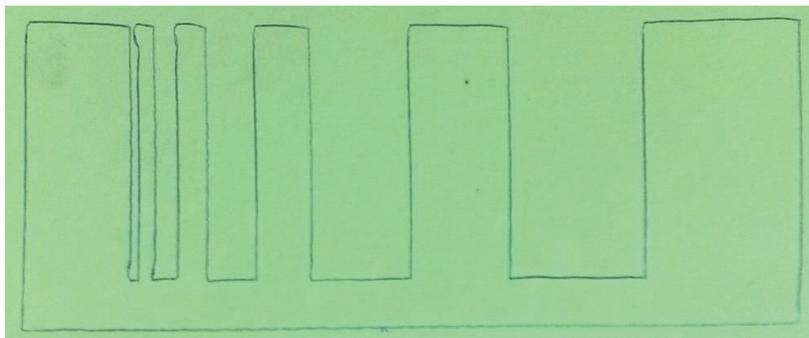


Figura 5.24. Prueba ejecutada en concordancia con la figura 5.23. Las muescas de 2 y 3 mm, no se realizó de manera satisfactoria de 5 a 130 mm/s.

Otro parámetro a verificar es dimensión y velocidad mínima para el trazo de círculos, en este caso se varía el diámetro y la velocidad, con el objetivo de comprobar los límites para formas circulares, en la figura 5.25 y 5.26 se indica los círculos trazados. Para cualquier velocidad el círculo que traza de manera satisfactoria es de 60 mm; para un diámetro de 55 mm solo se obtienen buenos resultados para velocidades menores o iguales a 8 mm/s (500 mm/min). Para diámetros menores a 50 mm y con distintas velocidades no se obtienen resultados satisfactorios. Una vez verificado los límites de trazo de la máquina se plantea la figura final la misma que se obtuvo buenos resultados para velocidades

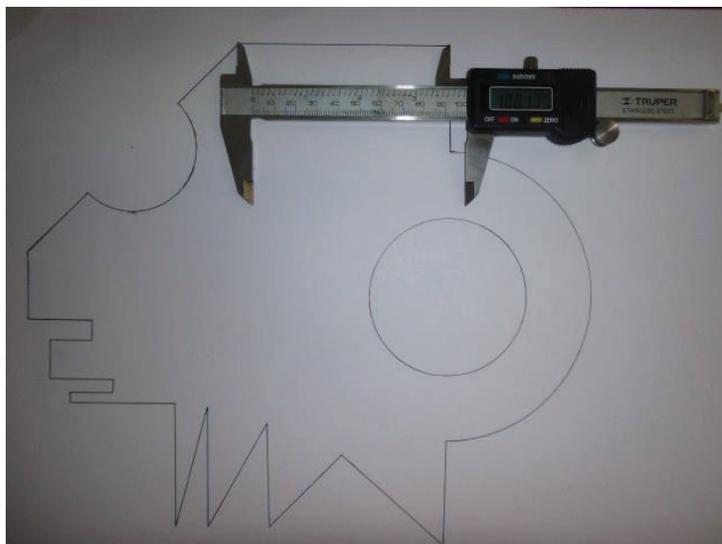


Figura 5.28. Trazo realizado con la máquina de corte para la figura 5.27.

Según las pruebas realizadas la máquina de corte mediante plasma controlado por computador, tiene la capacidad de cortar muescas mayores a 5 mm, y diámetros mayores o iguales a 60 mm, en velocidades comprendidas entre 8 a 130 mm/s. Para otro tipo de figura esta realiza el trazo sin dificultad como se indica en la figura 5.28. Según los resultados obtenidos esta máquina posee las características mostradas en la tabla 5.2 y es comparable con el equipo de corte de ELIMED.

Tabla 5.2.Comparación de características entre el proyecto de tesis y el equipo de ELIMED.

ITEM	<i>Proyecto de tesis</i>	
Sistema mecánico		
Estructura móvil de soporte de antorcha	Tipo puente	Tipo puente
Sistema de Trasmisión	Cremallera y tornillos	Cadenas y piñones ejes X y Y , husillo de bolas
Sistema de engrase	No	No
Antorchas de oxicorte	No	No
Mesa con agua	Opcional	Opcional
Filtro de polvo	No	No
Tipo de anclaje	Anclaje a piso con sistema de nivelación	Apoyado sobre piso
Área útil de corte en la mesa (mm)	1220 x 2440	1300 x 2500
Velocidad máxima de avance (m/min)	7.8	20
Velocidad máxima de corte (m/min)	7.8	12
Sistema eléctrico y control		
Sistema Portacables	Si	Si
Conexión eléctrica pantógrafo (V)	220	220
Motores	Motores de paso híbridos	Servomotores DC. con encoder
software de control	Mach 3	Mach 3
Sistema Operativo	Windows XP,Vista, 7	Windows 2000, XP,Vista, 7
Sensor de altura para la antorcha	Si (Adaptable)	Si
Conexión de red ethernet	No	No
Asistencia remota por internet	No	No
Interface con usuario	Pc	Pc
Memoria RAM mínima	1 Gb	512 Mb
Archivos compatibles	.dxf, .AI, .CDR, .BMP, .JPEG,Adobe illustrator, Corel Drawn.	.dxf, .AI, .CDR, .BMP, .JPEG,Adobe illustrator, Corel Drawn, Solid Works etc.
Velocidad de procesamiento mínima (GHz)	1,5	1
Plasma		
Marca de plasma	Cebora sound PC 10051/ T PFC	Cebora sound PC 10051/ T PFC
Espesor de máxima de corte (mm)	35	32
Presión de aire requerido (bar)	5	5
Caudal de aire requerido l/min	220	220
Servicio Técnico		
Garantía (años)	1	1
Asistencia remota	Si	Si
Capacitación manejo de equipo	Si	Si
Servicio de monitoreo durante la garantía	Si	Si
Incluye equipo de plasma	Se usara el existente	Si
Costo	4990 USD	28817 USD

CAPÍTULO 6

En el presente capítulo se analiza los costos que intervienen en la fabricación de la mesa de corte; se detalla todas operaciones que realizadas, trabajos de mecanizado de agujeros, roscas, fabricación de cremalleras, guías, bocines entre otros. También se considera la mano de obra empleada para el montaje de estructuras, fabricación de piezas mecánicas, soldadura de estructura, alineación de elementos críticos de la máquina y finalmente en la parte eléctrica; la compra de elementos como son motores, sensores, cables, interruptores, entre otros implementos eléctricos, así como también la compra del software de control. El costo total para la producción de un prototipo siempre es mayor al equipo que se produciría, razón por la que se ve reflejado en el costo final, la información se detalle en el presente capítulo.

6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del proyecto se plantea desde tres perspectivas: partes mecánicas, obteniendo costos directos como materiales (perfiles metálicos, pernos, acoples, rodamientos, chumaceras, entre otros); partes eléctricas, electrónicas y de control con costos directos en motores, sensores, cables, software y finalmente costo de mano de obra directa y costos indirectos.

6.2. COSTO DE PARTES MECÁNICAS

Los costos de materiales incluyen todos los elementos requeridos para la fabricación y armado de la mesa, tanto partes fijas como partes móviles, y también los soportes de planchas. Los costos se detallan en las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. En la tabla 6.1 se puede observar que existen elementos prefabricados, ahí se indica el acople entre el motor y el eje, en particular en este elemento se debe verificar que sus características sean aptas para la transmisión de movimiento en baja potencia. En la tabla 6.2 se detalla los costos de elementos estructurales, este tipo de elementos son fácil de conseguir en el mercado nacional. En la tabla 6.3 se detallan los costos por los elementos mecánicos, destinados al sistema de guiado y transmisión de movimiento; se debe verificar que las barras redondas que sirven de guías tengan una adecuada linealidad, con

el objetivo de prevenir problemas al momento de alineación, también se debe tener cuidado cuando se manipule las barras. La tabla 6.4 se muestra los costos por elementos de ajuste que no representan dificultad al momento de adquirirlos, puesto que existen en el mercado nacional.

Tabla 6.1. Elementos mecánicos prefabricados

Elemento	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
Chumaceras de pared para eje $\Phi \frac{3}{4}$ "	2	7.50	15.00
Rodamientos 6002	16	4.00	64.00
Acople flexible entre $\Phi 8$ y $\Phi \frac{3}{4}$ " mm	1	23.50	23.50
Subtotal [USD]			102.50

Tabla 6.2. Costos de elementos estructurales.

Elemento Acero ASTM A36	Longitud	Unidad	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
UPN180	6	m	1	188.50	188.50
HEB140	6	m	2	335.00	670.00
IPE120	6	m	1	90.00	90.00
PLT2-1/2"x1/4"	6	m	13	21.60	280.80
PL6	2.44x1.22	m	1	170.80	170.80
Barra roscada $\frac{3}{4}$ "	2.4	m	1	12.00	12.00
Ángulo 75x8	6	m	1	53.94	69.58
Ángulo 100x6	6	m	1	54.84	70.74
Subtotal [USD]					1552.42

Tabla 6.3. Costos de elementos mecánicos.

Elemento	Material	Cantidad	Dimensiones [mm]	Cantidad [kg]	Costo unitario [USD]	Costo [USD]
Barra	AISI 1045	7	500x40x40	48.00	4.00	192.00
Barra	AISI 1045	4	500x40x25	18.00	4.00	72.00
Eje hueco	SAE 65	1	$\Phi 27 \times \Phi 12 \times 280$	1.14	21.85	24.92
Eje hueco	SAE 65	1	$\Phi 31 \times \Phi 8 \times 380$	2.38	21.85	52.06
Eje	AISI 1018	2	$\Phi 25.4 \times 3600$	30.00	2.00	60.00
Eje	AISI 1018	2	$\Phi 25.4 \times 1770$	14.20	2.00	28.40
Eje	AISI 1018	2	$\Phi 19.1 \times 320$	1.50	2.00	3.00
Eje	AISI 1018	1	$\Phi 19.1 \times 400$	1.00	2.00	2.00
Subtotal [USD]						426.73

Tabla 6.4. Costos de elementos de ajuste.

Elemento	Cantidad [u]	Costo unitario [USD]	Costo [USD]
Arandelas planas 3/8"	48	0.10	4.80
Arandelas planas 3/4"	16	0.10	1.60
Arandelas de presión 3/4"	32	0.10	3.20
Arandelas de presión 3/8"	48	0.10	4.80
Arandelas planas 5/8"	32	0.10	3.20
Arandelas de presión 5/8"	32	0.10	3.20
Tuercas 3/8"	48	0.10	4.80
Tuercas 3/4"	58	0.30	17.40
Tuercas 5/8"	32	0.10	3.20
Pernos 3/8"x1-1/2"	48	0.25	12.00
Pernos 5/8"x2"	32	0.35	11.20
Pernos 1/2"x1-1/2"	8	0.10	0.80
Pernos M8x40	4	0.30	1.20
Pernos M6x30	4	0.15	0.60
Pernos M5x25	4	0.10	0.40
Pernos 1/4"x1"	34	0.40	13.60
Pernos 3/8"x1-1/4"	26	0.25	6.50
Pernos 5/8"x1-1/2"	10	0.40	4.00
Pernos 1/2"x1-1/2"	10	0.40	4.00
Pernos allen M8x40	70	0.25	17.50
Pernos allen M6x25	74	0.10	7.40
Pernos allen M8x40	42	0.25	7.40
Pernos allen M8x25	24	0,20	7.40
Subtotal [USD]			140.20

6.3. COSTOS PARTES ELÉCTRICAS, ELECTRÓNICAS Y DE CONTROL

Las partes eléctricas o actuadores son motores de paso, funcionan a través de señales de control por medio del programa MACH3 y con una interfaz de transferencia de datos entre los controladores y el computador. Los detalles de costos de cada parte se indican en la tabla 6.5. En este caso los elementos más caros son los motores de paso y sus controladores.

Tabla 6.5. Costo de partes eléctricas, electrónicas y de control.

Elemento	Cantidad	Costo /unidad [USD]	Costo [USD]
Motor paso a paso Nema 42 [29 N m]	1	621.18	621.18
Controlador motor paso driver DM2722A, 110-220 V	1	932.27	932.27
Motor paso a paso nema 34 [11N m]	1	382.15	382.15
Controlador DM860A,110-220 VAC para motor	1	61780	617.80
Motor paso a paso nema 23 [3 N m]	1	191.48	191.48
Controlador DM542A, 110-220VAC para motor	1	232.03	232.03
Tarjeta de interfaz	1	18.25	18.25
Cable de conexión PC a tarjeta de interfaz	1	12.15	12.15
Pulsador N/A - NC	4	6.17	24.68
Pulsador paro de emergencia con retención	1	2.52	2.52
Interruptor 20 A	1	12.20	12.20
Canaletas anilladas	12	6.00	46.00
Software de control MACH 3	1	240.80	240.80
Subtotal [USD]			3333.51

6.4. COSTO POR TRANSPORTE Y MANO DE OBRA

El costo de mano de obra incluye todos los gastos de preparación de las vigas y elementos mecánicos, tanto de la parte fija como de la parte móvil, Es necesario considerar los costos por transporte, los que se indican en la tabla 6.6. Los gastos de uso de máquinas herramientas, perforados, cortes; como se detalla en la tabla 6.7.

Tabla 6.6. Costo por transporte.

Ítem	Costo [USD]
Transporte de elementos EPN hacia Taller	150
Transporte de elementos a lugar de ensamble	150
Transporte de máquina armada a talleres EPN	250
Subtotal [USD]	550

Tabla 6.7. Costo por mano de obra.

Mano de obra	Unidad	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo [USD]
Perforado de agujeros en HEB	Unid.	1	150.00	150.00
Perforado de IPE y fabricación de rosca	Unid.	2	100.00	200.00
Fabricación de ruedas guías	Unid.	8	5.00	40.00
Fabricación de ejes soporte de ruedas guías	Unid.	8	7.00	56.00
Perforado y rectificado de ejes guías	Unid.	1	75.00	75.00
Corte de planchas y armado de tubos soporte tanque	Unid.	1	50.00	50.00
Perforado y fabricación de ranuras ángulo 100x6	Unid.	1	140.00	140.00
Fresado de guías eje x, y ,z	Unid.	1	70.00	70.00
Mecanizado de mecanismo de elevación del ejes z	Unid.	1	60.00	60.00
Maquinado de tornillo mecanismo de elevación de eje z	Unid.	120	1.00	120.00
Limpieza y pintura de elementos	Día	2	70.00	140.00
Nivelación de máquina en sitio	Día	1	50.00	50.00
Subtotal [USD]				1151.00

6.5. COSTO POR INGENIERÍA Y PLANIFICACIÓN.

El costo por la ingeniería, planos, seguimiento de fabricación y ensamble, es considerado para este proyecto. Al desarrollar un prototipo, este precio incrementa el costo total del proyecto. Sin embargo se debe considerar que al desarrollar varios ensambles, este costo puede ser dividido entre el número de máquinas a construir con lo cual el costo disminuye. El costo a ser considerado es de 3000 USD.

Costo total

Una vez analizado los costos, se considera todos los rubros que implican al costo final del producto, y finalmente se establece el costo final del producto. El costo total del proyecto se indica en la tabla 6.8.

Tabla 6.8. Resumen de costos.

Ítem	Costo [USD]
Elementos mecánicos prefabricados	102.50
Costos de elementos estructurales	1552.42
Costos de elementos de ajuste	140.20
Costos de elementos mecánicos	426.73
Costo de partes eléctricas, electrónicas y de control	3333.51
Costo por mano de obra	1151.00
Costo por transporte	550.00
Costo por ingeniería y planificación	3000.00
TOTAL [USD]	10256.36

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Para la selección de opciones previas se realizó esquemas donde se destacan características relevantes, el costo y la funcionalidad son los principales factores que se deben considerar.
- Se debe entender que el funcionamiento de los motores de paso y servomotores es diferente. Al considerar un número de revoluciones en un motor de pasos significa un torque de salida diferente en comparación a los servomotores. Los motores de paso son los más adecuados para este tipo de sistema, puesto que el corte mediante antorcha de plasma no requiere de una extrema precisión y su costo es relativamente bajo en comparación a los servomotores.
- La seguridad contra golpes de la máquina está protegida por el programa MACH3 por medio de la opción límites por software (soft limits), y físicamente por los finales de carrera.
- El programa MACH3 ciertamente es un controlador de máquina muy poderoso y económico, gracias al uso del puerto paralelo se obtiene una comunicación adecuada con la tarjeta de interfaz DB25-1205, y esto a la vez con los controladores DM542A para el eje Z, DM860A para el eje Y, DM2722A para eje X. El mencionado programa funciona con una velocidad mínima de núcleo de 25000 Hz, fácilmente alcanzado por equipos de cómputo básicos y de bajo costo.
- El programa MACH3, es capaz de ejecutar 500 líneas de programación en la versión de demostración, esto facilita las operaciones previas de calibración y pruebas.
- El parámetro que determina el costo final proyecto, son los motores que pueden ser de paso o servomotores, en este caso se utilizó los motores de paso por ser más económicos que los servomotores. Sí se usa servomotores, se debe verificar que la resolución de encoders, sea

compatible o alcanzable con la velocidad de funcionamiento del núcleo o procesador del computador.

- Una modelación tridimensional a escala real, facilita la interpretación de todos los elementos y sus características físicas, para la construcción adecuada y eliminando posibles errores de fabricación. Estos modelos también son usados para la estimación de esfuerzos.
- La precisión del movimiento para cada eje depende directamente de la precisión de los mecanismos de transmisión y por consiguiente de su fabricación.
- La mesa de corte de plasma está sujeta a mejoras, mismas que pueden ser incorporadas, como por ejemplo la adaptación de un cuarto eje para realizar cortes biselados.
- El equipo generador de plasma debe tener una fuente de alimentación independiente o por separado de los controladores de motores y equipo de cómputo, con el objetivo de prevenir fallas en el sistema eléctrico.
- Para tener una mayor precisión en los sistemas de transmisión lineal se debe considerar cremalleras con pasos pequeños semejante o comparables a los 2 mm.

7.2. RECOMENDACIONES

- Para el dimensionamiento de capacidad de motores, se usa un modelo tridimensional aproximado, esto facilita la selección de estos motores con un rango de error mínimo, mismo que es eliminado con la selección de motores con capacidades nominales y existentes en el mercado.
- La mesa de corte por plasma tiene riesgos mecánicos como aplastamientos de manos, cortes, quemaduras, atrapamientos entre objetos, golpes, riesgos físicos como vibraciones y radiaciones no ionizantes. Tales riesgos deben ser considerados durante la fase diseño para limitar los potenciales efectos en el personal que usa el equipo.
- El espesor máximo a ser cortado es plancha de acero de 35 mm de espesor, debido a las limitaciones del equipo, si se desea cortar planchas

de mayor espesor, se debe aumentar la capacidad del equipo generador de plasma.

- El espacio asignado para la ocupación del equipo, debe tener características de suelo hormigonado y nivelado lo máximo posible, con el objetivo de prevenir vibraciones, además debe estar libre de polvo y humedad, esto evitará tener daños prematuros y elementos mecánicos y electrónicos.
- Las guías de la mesa pueden ser mejoradas, mediante el reemplazo a guías tipo M, debido a limitaciones del presupuesto no se las uso. Estas guías son comúnmente utilizadas por su bajo coeficiente de fricción, alrededor de 0.02, lo cual mejora la precisión y vida útil de los actuadores.
- La máquina debe ser utilizada por personal capacitado en el aspecto de seguridad y conocimientos técnicos.
- Es importante recalcar la seguridad industrial para este tipo de maquinaria, para lo cual se debe respetar los letreros de prevención, el uso de equipo de seguridad y proveer de protecciones físicas para cuando la máquina realice una operación de corte para evitar riesgos al personal.
- Con el equipo diseñado y construido se puede también fabricar partes destinadas a la cerrajería artística.
- Las mejoras que se pueden implementar a este equipo comprenden: la aplicación de sistema de arrastre de cables o más conocidos como orugas, la aplicación más ejes para el corte biselado. También mejoras en los finales de carrera como puede ser la aplicación de sensores inductivos u ópticos. Se puede también implementar un control de altura de la antorcha de plasma, con el cual se puede controlar automáticamente la altura en el eje Z, logrando con esto el corte de planchas con cierto grado de ondulación.
- Los temas a profundizarse para el uso de este equipo es el aprendizaje de programación CNC, parámetros de calibración de equipos plasma. En la actualidad existe software para la interpretación automática de fotografías, los cuales convierten las imágenes en códigos de control numérico, lo que facilita la modelación y disminuye los tiempos de programación.

- En base al mismo sistema de control del equipo desarrollado se puede aplicar la automatización de fresadoras, con la verificación repotenciación de los motores. O a su vez con una menor capacidad dimensional y menores torques en motores de paso se puede usar para el corte y perforado de placas impresas destinadas a circuitos electrónicos.
- Con una simple programación de control numérico se puede lograr la aplicación a sistemas de corte de tubería, más conocidos como cortes tipo boca de pez, estos cortes el facilitan el ensamble de estructuras tubulares. Para esta aplicación se puede utilizar el software MACH3 realizando modificaciones en el eje rotatorio que correspondería al giro del tubo. Otra opción sería la aplicación de programación para la adquisición y envío de datos entre equipos de cómputo y controladores de motores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **JOHN A. SCHEY.** *Procesos de Manufactura*. 3ra Edición : McGraw-Hill, 2002.
2. **MIKELL P. GROOVER.** *Fundamentos de Manufactura Moderna* . 3ra Edición : McGraw-Hill, 1997.
3. **SEROPE KALPAKJIAN.** *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta Edición : Pearson Education, 2008.
4. **DAL KOSHAL.** *Manufacturing Engineer's Reference Book*. 1ra Edición : Butterworth Heinemann, 1993.
5. **AMERICAN WELDING SOCIETY.** *AWS C4.6M:2006-Thermal Cutting - Classification of Thermal Cuts – Geometric Product Specification and Quality Tolerances*. 1ra Edición : s.n., 2006.
6. **H. S. BAWA.** *Procesos de Manufactura*. 1ra Edición : McGraw-Hill, 2007.
7. <http://www.directindustry.es/prod/kaltenbach/entalladoras-para-perfiles-estructurales-5482-46241.html>.
8. <http://www.elimed.com.ec/corte-por-arco-de-plasma/inversores/-plasma/104-cebora-plasma-sound-pc-10051t>.
9. http://pdf.directindustry.es/pdf/bug-o-systems/espanol-modular-drive-system/Show/11660-29070-_2.html.
10. **JAMES N. KERAITA.** *PC-Based Low-Cost CNC Automation of Plasma Profile Cutting of Pipes*. s.l. : ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007.
11. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Corte-por-plasma-CRM-16258.html>.
12. **HUBERT RAUSCHER.** *Plasma Technology for Hyperfunctional Surface*. 1ra Edición : Wiley-VCH, 2010.
13. **N. VENKATRAMANI.** *Industrial Plasma Torches and applications*. s.l. : Bhabha Atomic Research Centre, 2002.
14. **BOC-A Member of The Linde Group.** *Facts about plasma technology and plasma cutting*. 2011.
15. **MR. KETUL N. PRAJAPATI.** *A Review on Plasma Arc Cutting (PAC) Process Parameters*. s.l. : International Journal for Scientific Research & Development, 2015.
16. **S. B. MAJOLAGBE.** *Radiation Effects: Recommendations for Safe Plasma-Flame Cutting Operation*. s.l. : Journal of Scientific Research & Reports, 2015.
17. **ZURAB SABASHVILI.** *Advantages of Plasma Cutting in Superheated Water Vapor*. s.l. : Journal of Technical Science and Technologies, 2014.
18. **SUK-HWAN SUH.** *Theory and Design of CNC Systems* . 1ra Edición : Springer, 2008.
19. **FERNANDO TORRES.** *Robots y Sistemas Sensoriales*. 2da Edición : Pearson Education , 2002.
20. **JOSEP BALCELLS.** *Autómatas Programables*. 1ra Edición : Alfaomega, 1998.

21. **STOCK DRIVE PRODUCTS/STERLING INSTRUMENT.** *Catalogo de productos: D805 Master Catalog | Metric Automation & Drive Components .*
22. <http://www.directindustry.es/prod/martin-sprocket-gear/engranajes-de-rueda-y-tornillo-sin-fin-9091-861609.html>.
23. <http://www.directindustry.es/prod/nsk-europe/guiados-lineales-de-alta-precision-233-953479.html>.
24. <http://www.ozak.com.sg/linearg1-e.html>. [En línea]
25. **MANJUSHREE D. SUTAR.** *Linear Motion Guideways.* s.l. : IJIET, 2013.
26. **YANHONG ZHANG.** *Research on Improving Precision and Stability of Active Magnetic Levitation.* 2014.
27. <http://www.zappautomation.co.uk/es/flexible-couplings/284-bf1-d40166-acoplamiento-flexible.html>.
28. <http://www.emagister.com/curso-balanceo-acoplamiento-mecanica/acoplamientos-flexibles>.
29. http://www.autocapacitacion.net/06MANTENIMIENTO/06.5Bandas_cadenas/0651bandas.htm.
30. <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/pinon-70195.html>.
31. **R. NEUGEBAUER.** *Mechatronic Systems for Machine Tools.* s.l. : ELSEVIER, 2007.
32. <http://www.machsupport.com/>. [En línea]
33. **BobCAD-CAM.** *Guía de inicio-Versión 23: Fresa y Torno.* 2010.
34. **ANDRÉS GIL NEGRETE.** *Tecnologías Asistidas por Plasma: Fundamentos, Aplicaciones Industriales y Tecnológicas.* 1ra Edición en Español : McGraw Hill, 1997.
35. **GEORG WESTERMANN.** *Montaje Ajuste y Verificación de Elementos de Máquinas.* 1ra Edición en Español : Reverté, 2003.
36. <http://www.elimed.com.ec/corte-por-arco-de-plasma/inversores/-plasma/104-cebora-plasma-sound-pc-10051t-pdf>.
37. **NICOLAS LARBURU.** *Prontuario de Máquinas .* 13ra Edición : Thomson Editores, 2001.
38. **STOCK DRIVE PRODUCTS / STERLING INSTRUMENT.** *Catalogo de Productos: D805 Master Catalog / Metric Automation & Drive Components.*
39. <http://www.directindustry.es/prod/martin-sprocket-gear/engranajes-de-rueda-y-tornillo-sin-fin-9091-861609.html>.
40. <http://www.ozak.com.sg/linearg1-e.html>.
41. <http://www.directindustry.es/prod/nsk-europe/guiados-lineales-de-alta-precision-233-953479.html>.
42. <https://www.plasmacam.com/digitalheightcontrol.php>.
43. <http://www.directindustry.es/prod/fastcut-cnc-inc/maquinas-corte-por-plasma-cnc-64751-1060563.html>.
44. <http://tienda.patagoniatecnology.com/tienda/impresora-3d-insumos/nema17-motor-paso-a-paso/>.

45. <http://www.torquesystems.com/Products/mdm-5000-brushless-servo-motor/>.
46. **V. M. FAIRIS.** *Diseño de Elementos de Máquinas.* 4ta Edición : Montaner y Simón, 1997.
47. **ROBERT L. MOTT.** *Diseño de Elementos de Máquinas.* 4ta Edición : Pearson Education, 2006.
48. **MICHAEL F. ASHBY.** *Materials Selection in Mechanical Desing.* 4ta Edición : Elsevier, 2011.
49. **PAUL ACARNLEY.** *Stepping Motors a Guide to Theory and Practice .* 4ta Edición : The Institution of Engineering and Technology, 2007.
50. **WILFRED VOSS.** *A Comprehensible Guide to Servo Motor Sizing.* 1ra Edición : Copperhill Technologies Corporation, 2007.
51. **JOSEPH EDWARD SHIGLEY.** *Diseño en Ingeniería Mecánica.* 5ta Edición : Mc Graw Hill, 1999.
52. **ASM METALS HANDBOOK.** *Volume 2: Properties & Selection: NonFerrous Alloy and Special - Purpose Materials.* s.l. : ASM International.
53. **THOMAS H. BROWN JR.** *Marks' Calculations for Machine Design .* 1ra Edición : Mc Graw Hill, 2005.
54. **LIBARDO VANEGAS.** *Blogs Técnicos: Capítulo 8.* s.l. : Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
55. <http://www.directindustry.es/prod/carlo-gavazzi/sensores-proximidad-inductivos-6077-734291.html>.
56. <http://www.mescorza.com/neumatica/sensoresweb/sensores/optico1.htm>.
57. <http://www.tme.eu/es/details/3se5212-0be10/interruptores-finales/siemens/>.
58. <http://es.dreamstime.com/fotograf%C3%ADa-de-archivo-bot%C3%B3n-de-paro-de-emergencia-image15562072>.
59. <http://www.machsupport.com/software/plugins/>.
60. <http://www.cnczone.com/forums/automation-technology-roducts/123275-keeling-db25-breakout-board-problem.html>.
61. <http://www.candcnc.com/>.
62. <http://www.eagleplasma.com/thc>.
63. **ARCISOFT.** *Traducción al Español del Manual Oficial de MACH3.* s.l. : ArcSoft Software Incorporated, 2005.

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE PROPIEDADES DE LOS GASES

- *Argón*

El argón es un gas inerte, o químicamente neutral, el peso atómico es 39.95. Este gas ayuda a la expulsión del material fundido desde la ranura de corte por medio del impulso de alta densidad de chorro de plasma. La energía de ionización es baja en el orden de 15.76 eV, relativamente fácil de ionizar. En estado puro frecuentemente se utiliza para la ignición del arco de plasma, cuando el arco se enciende el gas de corte se suministra y se inicia el proceso de corte. El argón posee relativamente una pobre conductividad térmica, por lo que no es ideal para utilizarlo como gas de corte mediante plasma, la velocidad de corte es relativamente baja y produce bordes escamosos y con vértices despuntados.

- *Hidrógeno*

En comparación con el argón, el hidrógeno posee un peso atómico de 1 y una conductividad térmica relativamente alta. Cuando el arco de plasma choca con la superficie de corte, se recombinan las partículas cargadas y liberan energía en forma de calor, con lo que se incrementa la temperatura del material fundido. El hidrógeno proporciona características similares al argón si se lo usa como gas de plasma. Sin embargo, si se lo combina con el argón, la mezcla proporciona una alta transferencia de energía cinética y suficiente energía de corte.

- *Mezcla argón – hidrógeno*

Esta mezcla se usa para el corte de aceros y aluminios de alta aleación. Con pequeños porcentajes de hidrógeno añadidos al argón se mejora la calidad del borde cortado. El efecto reductor del hidrógeno proporciona superficies lisas, libre de oxidación en los bordes cortados. Esta mezcla se utiliza para cortar espesores de hasta 150 mm. La cantidad adecuada de hidrógeno va hasta un 35% del volumen y depende del espesor del material. En cantidades superiores a este porcentaje no contribuye al incremento de la velocidad de corte. Un 40% de hidrógeno en la mezcla ocasiona huecos en la superficie de corte y aumento de la formación de rebabas en el borde inferior de la pieza de trabajo (14 pág. 18).

- ***Nitrógeno***

En comparación con las propiedades físicas del argón e hidrógeno, el nitrógeno se ubica en un lugar intermedio. La conductividad térmica es más alta que la del argón y bajas en comparación al hidrógeno. Por esta razón el nitrógeno solo puede ser utilizado como gas de plasma, permite cortes rápidos y libres de óxido de piezas de paredes delgadas. La desventaja de este gas es que no se pueden conseguir lados perfectamente paralelos. El ángulo de bisel que se obtiene depende de gran manera del volumen del gas y la velocidad de corte. Disminuye la soldabilidad debido a la concentración de nitrógeno en los bordes cortados y se produce poros en el metal de soldadura.

- ***Mezclas nitrógeno – hidrógeno***

Este tipo de mezcla se utiliza para el corte de aceros y aluminios de alta aleación. Permite cortes con borde paralelos, se consigue velocidades de corte considerablemente altos en comparación al argón. La oxidación en las superficies cortadas es menor en comparación al corte con nitrógeno puro. La mezcla de estos dos gases va en el orden de 20% de hidrogeno en volumen (14 pág. 18).

- ***Mezclas argón - nitrógeno – hidrógeno***

Se utilizan para el corte de acero y aluminio de alta aleación, permite obtener bordes cortados de calidad, la formación de rebabas es menor que las mezclas argón hidrógeno. Esta mezcla se compone de 50% a 60% de argón, de 40% a 50% de nitrógeno e hidrógeno, siendo el 30% de nitrógeno. La cantidad de hidrógeno es proporcional al espesor de la pieza a ser cortada. Con este tipo de mezcla se consiguen bordes sin rebabas para aceros de alta aleación y aceros estructurales, con altas velocidades de corte (14 pág. 18).

- ***Oxígeno***

Es utilizado como gas de plasma para el corte de aceros no aleados y de baja aleación. Cuando el oxígeno se mezcla con la masa fundida de material, esta se vuelve más fluida, permite bordes cortados libre de rebaba y no redondeados; el oxígeno no ocasiona que se forme nitrógeno en el borde cortado y por

consiguiente se obtiene una superficie de fácil soldabilidad. La alta velocidad con la que se consiguen los cortes se debe a las reacciones químicas del oxígeno con el metal fundido, la zona afectada térmicamente es relativamente pequeña, razón por la cual las propiedades mecánicas del material no sufren deterioro.

- *Aire*

El aire es una mezcla natural que consta de 78.18% de nitrógeno y 20.8% de oxígeno, posee una alta energía para el corte, razón por la que es utilizada como un gas de plasma; permite cortar aceros no aleados, de baja aleación, aceros y aluminios de alta aleación; permite cortar planchas delgadas. Cuando se corta acero no aleados, los bordes presentan una superficie relativamente lisa. La desventaja es que el aire aumenta el contenido de nitrógeno en la superficie cortada, por lo tanto se deben dar un acabado posterior si las piezas se van a soldar en sus bordes.

ANEXO 2

TIPOS DE SERVOMOTORES

- *Servomotor DC*

El estator consiste de un marco cilíndrico, el cual juega un rol de pase del flujo magnético y soporte mecánico, el imán está dentro de marco cilíndrico. El rotor consiste de un eje y escobillas. Un conmutador y el rotor metálico soportan al estator y están unidos a la parte exterior del eje y un inducido está enrollado en el bastidor metálico de soporte rotor en la final del eje se encuentra el detector encargado de detectar la velocidad de rotación que se genera en el rotor, en general un encoder óptico es utilizado como detecto.

En el servo motor DC, un controlador puede ser diseñado fácilmente mediante el uso de un circuito simple debido a que el par es directamente proporcional a la cantidad de corriente. Por lo tanto, la eliminación eficiente del calor es esencial para generar un alto par. El rango de velocidad de los servomotores de corriente continua es muy amplio y el precio es muy bajo. Sin embargo, la fricción con las escobillas resulta en la pérdida mecánica y el ruido.

- *Servomotor de inducción tipo AC*

La estructura de un servomotor de inducción de tipo AC es idéntica a la de un motor de inducción general. Si una multi-fase de corriente alterna fluye a través de la bobina de un estator, se induce una corriente en la bobina del rotor y la corriente de inducción genera un torque. En este tipo de servomotor de CA, el estator se compone de un bastidor, un núcleo de estator, una bobina de la armadura.

Un motor de inducción de AC de tipo servo tiene una estructura simple y no necesita el detector de posición relativa entre el rotor y el estator. Sin embargo, debido a que la corriente de campo debe fluir continuamente durante la parada, una pérdida de calentamiento se produce y el frenado dinámico es imposible, a diferencia del servomotor de AC.

- *Servomotor sincrónico tipo AC*

El estator se compone de un bastidor cilíndrico y un núcleo de estator. El núcleo del estator se encuentra en el marco y una bobina del inducido se enrolla alrededor del núcleo del estator. El extremo de la bobina está conectado con un cable conductor y la corriente es suministrada desde el hilo conductor. El rotor consiste en un eje y un imán permanente y el imán permanente se adjunta al exterior del eje. En un servomotor síncrono de tipo AC, el imán está unido a un rotor y una bobina del inducido se enrolla alrededor del estator a diferencia de un servomotor DC. En este tipo de servomotor de AC, la armadura es linealmente proporcional al torque, fácil de parar debido a un freno dinámico que funciona durante la parada de emergencia.

ANEXO 3

ENCODERS

- *Encoder Incremental*

Permite que un sensor óptico detecte el número de segmentos que dispone el disco y otro sensor detecte la posición cero de dicho disco. Con un encoder incremental es fácil de transmitir una señal debido a que el número de cables necesarios para el envío de señales de salida es pequeño. El número de impulsos de salida del codificador no indica la posición de giro absoluta de un eje, sino que indica el ángulo de rotación del eje. El codificador incremental tiene una simple estructura y es barato, también es fácil de transmitir la señal de salida por la baja cantidad de cables. El número de pulsos emitidos por el codificador no indica la posición absoluta de rotación pero si indica el ángulo de rotación del eje. Para conocer el ángulo absoluto de giro, los pulsos de salida deben ser sumados y el ángulo de rotación se calcula con el número de pulsos acumulados; para que pueda detectar la posición absoluta requiere circuitos complementarios. Cuando el equipo está apagado, este tipo de codificador no puede indicar una posición, debido a que solo genera pulsos, tales pulsos deben ser transformados en una señal analógica proporcional a la frecuencia de pulso en un convertidor de frecuencia a voltaje; con el objetivo de detectar la velocidad con la que gira el eje.

- *Encoder absoluto*

Permiten conocer la posición exacta en cada momento sin tener que dar la vuelta entera para detectar el punto cero del disco. El principio de funcionamiento de un encoder absoluto es muy similar al de un encoder incremental en el que un disco que gira, con zonas transparentes y opacas interrumpe un haz de luz captado por foto receptores, luego estos transforman los impulsos luminosos en impulsos eléctricos los cuales son tratados y transmitidos por la electrónica de salida.

El foto receptor detecta la señal luminosa única que normalmente se codifica en código Gray. El uso de este código presenta una ventaja, consiste que en cada cambio de sector sólo cambia el estado de una de las bandas, con lo que se evita errores por falta de alineación de los captadores.

La diferencia con respecto al encoder incremental la posición está determinada por el cálculo del número de impulsos con respecto a la marca de cero, en los encoder absolutos la posición queda determinada mediante la lectura del código de salida, el cual es único para cada una de las posiciones dentro de la vuelta.

ANEXO 4

FUNCIONES NCK

- *El intérprete*

Realiza las funciones de leer el programa de la pieza. Lee e interpreta el siguiente bloque de comando, mientras el anterior se está ejecutando. Si el bloque que se está interpretando es más largo que el tiempo para ejecutar y terminar la orden, la máquina se deberá detener inevitablemente. Para evitar esto se utiliza una memoria interna que almacena temporalmente los datos interpretados y son transferidos a la siguiente etapa.

- *El interpolador*

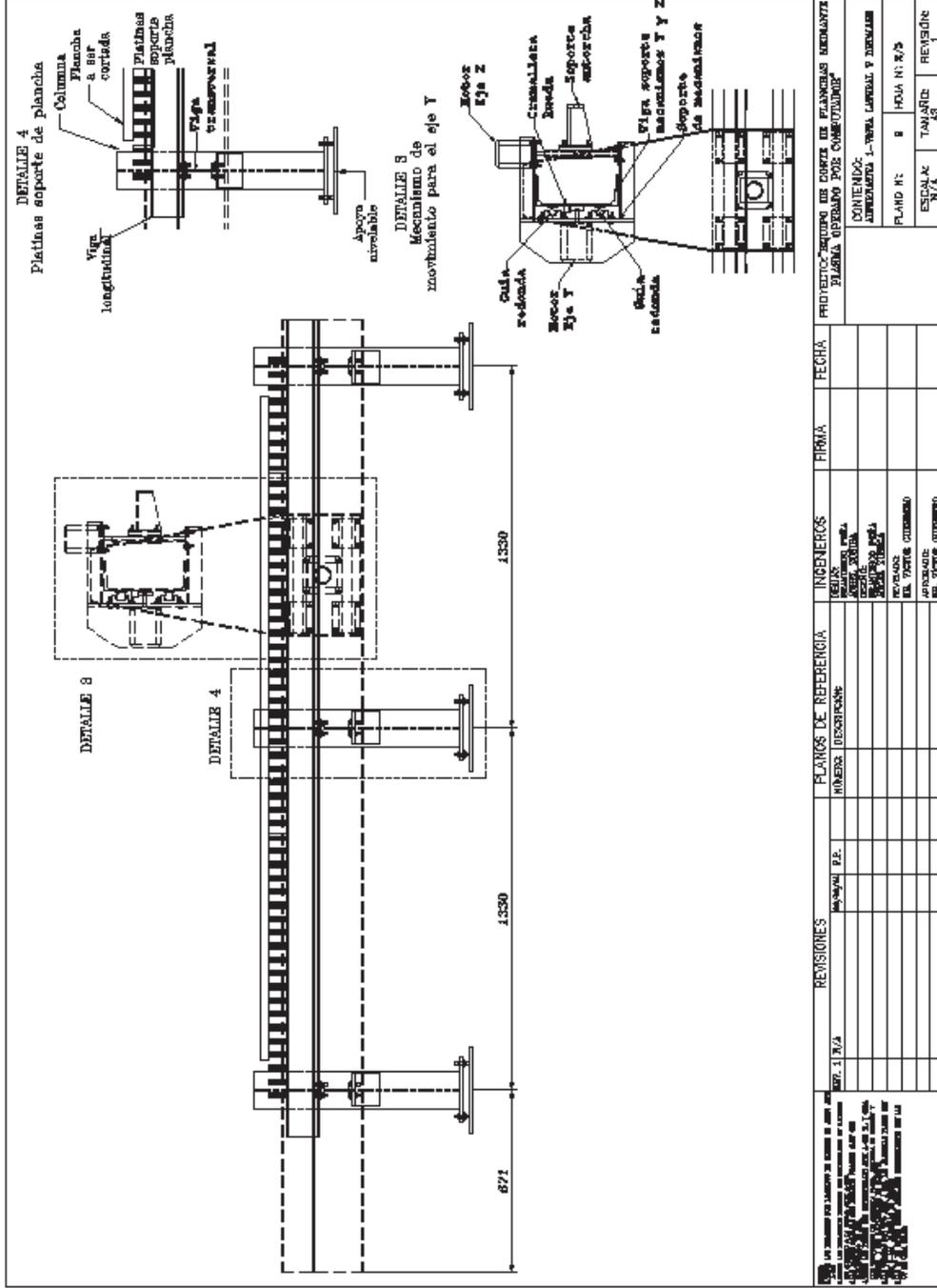
Es el encargado de leer los datos del intérprete, almacenados en la memoria interna, realiza el cálculo de la posición y velocidad de cada eje, que a su vez emite información en una memoria temporal de almacenamiento digital: primero en ingresar – primero en salir (buffer FIFO), que es utilizado por el controlador de aceleración / desaceleración. Un interpolador lineal, circular, parabólico y de spline es utilizado por el sistema NC. Tales interpoladores generan pulsos correspondientes a los datos de la trayectoria en relación al tipo de trayecto: línea, círculo, parábola y spline, los cuales son enviados a la memoria intermedia FIFO, el número de pulsos es en función de la longitud del trayecto y la frecuencia es en función de la velocidad de desplazamiento. El desplazamiento por pulso determina la precisión del sistema, si se toma un movimiento de los ejes de 0.002 mm por pulso; significa que el sistema NC tiene una precisión de 0.002 mm.

- *Control de posición*

Se ejecuta con los datos generados por el interpolador, la vibración mecánica y el choque puede ocurrir cada vez que el movimiento se inicia o se detiene. Para evitar estos efectos se ejecuta un filtrado de aceleración / desaceleración antes de que los datos interpolados se envíen al controlador de posición. También existe el método de aceleración / desaceleración después de la interpolación. Los datos de

control de aceleración / desaceleración, son enviados a un controlador de posición por medio de una base de datos transmitidos en intervalos de tiempo constante. El controlador de posición es conocido como PID (proporcional – integral – derivativo). El valor proporcional determina la reacción del error actual, cuando el error es muy grande, es controlado por el modo proporcional; la consecuencia es la generación de un error constante. El modo de control integral tiene el propósito de disminuir y eliminar el error de estado estacionario, generado en el modo proporcional. El modo derivativo actúa cuando el valor absoluto del error cambia; es decir si el valor absoluto de error es constante solo trabajan los modos proporcional e integral. El objetivo de acción derivativa es disminuir el error al máximo corrigiendo con la misma velocidad que se produce, de esta manera impide que el error se incremente. El controlador PID, imite comandos de velocidad al sistema de accionamiento del motor con el objetivo de minimizar la diferencia entre la posición de mando y la posición real

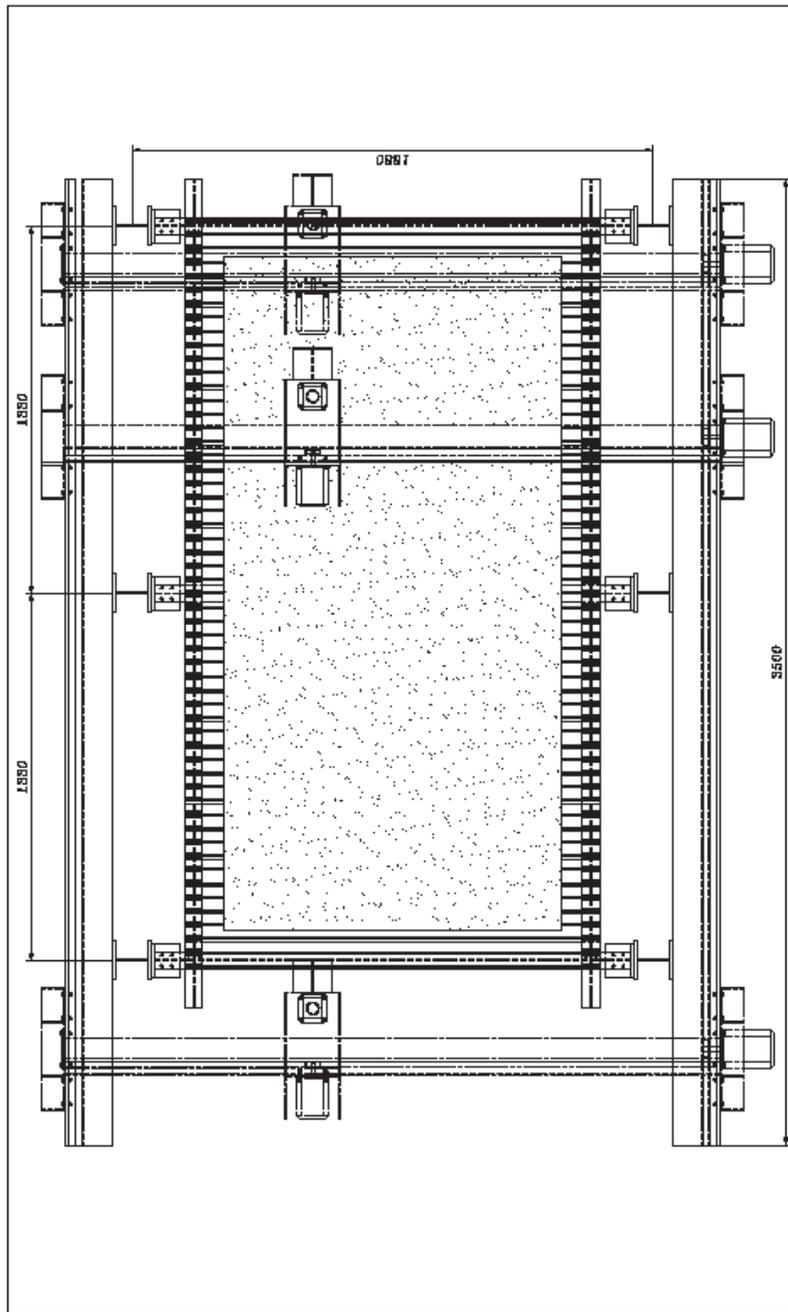
Vista Lateral y Detalles



1. Este documento es propiedad de la empresa de la que se origina y no debe ser reproducido, copiado, distribuido o utilizado en forma alguna sin el consentimiento escrito de la empresa.

REVISIONES	PLANOS DE REFERENCIA	INGENIEROS	FIRMA	FECHA	PROYECTO/GRUPO DE OBRAS DE PLANTAS REMANENTE PLANTA OPERANDO POR COMBUSTIBLE
REV. 1 N/A		INGENIERO EN JEFE: JORGE SORIANO INGENIERO EN JEFE: JORGE SORIANO			CONTENIDO: ANEXOS 1.- VIGA LONGITUDINAL Y DETALLES
					PLANO N°: 8 HOJA N°: 8/8
					ESCALA: N/A
					TAMAJO: 20
					REVISION: 1

Vista Superior



REVISIONES NO. 1 19 74		INGENIEROS DE LA ESCUELA PARA LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA		FIRMA		FECHA	
PLANOS DE REFERENCIA NUMERO REFERENCIA		PROYECTO: "BARRIO DE LOS PLANCIOS ABOLUTOS" PLAZA DEBARRIO DE LOS PLANCIOS		CONTENIDO: ALBERGATA 1-7ERA ETAPAS		PLANO N.º 3 HOJA N.º 39	
REVISIONES NO. 1 19 74		INGENIEROS DE LA ESCUELA PARA LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA		FIRMA		FECHA	
PLANOS DE REFERENCIA NUMERO REFERENCIA		PROYECTO: "BARRIO DE LOS PLANCIOS ABOLUTOS" PLAZA DEBARRIO DE LOS PLANCIOS		CONTENIDO: ALBERGATA 1-7ERA ETAPAS		PLANO N.º 3 HOJA N.º 39	
REVISIONES NO. 1 19 74		INGENIEROS DE LA ESCUELA PARA LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA		FIRMA		FECHA	
PLANOS DE REFERENCIA NUMERO REFERENCIA		PROYECTO: "BARRIO DE LOS PLANCIOS ABOLUTOS" PLAZA DEBARRIO DE LOS PLANCIOS		CONTENIDO: ALBERGATA 1-7ERA ETAPAS		PLANO N.º 3 HOJA N.º 39	

ANEXO 8

CALIBRACIÓN

Realizado las pruebas por separado a cada eje, se envía un conjunto de órdenes en todos los ejes de la máquina, se verifica que los movimientos cumplan con las órdenes enviadas. Se procede a calibrar los finales de carrera de la máquina, Una vista general de la máquina se muestra en la figura A1.



Figura A1. Pruebas de funcionamiento de los ejes de movimiento de la máquina de corte

- *Calibración de dimensiones en el recorrido de ejes.*

La calibración de los desplazamientos de los ejes se inicia con la señalización de una referencia, por ejemplo en el eje X-X se marca con un lápiz y una escuadra, como se observa en la figura A2. (a), luego por medio del programa MACH3 y código de control numérico como ejemplo G00 X200, después con la escuadra se marca hasta donde se desplazó y se mide y verifica que la distancia recorrida coincida con la distancia del comando antes ejecutado, si el valor no coincide realizamos el ajuste en el programa MACH3.

Se repite la operación para el eje Y-Y como se muestra en la figura A2. (b) y por último con la ayuda de un calibrador pie de rey se verifica el desplazamiento del eje Z-Z, como se indica en la figura A2. (c)



(a)

(b)



(c)

Figura A2. Calibración de las dimensiones de los ejes de la máquina.
a) Medición de eje X-X, b) Medición de desplazamiento en el eje Y-Y, c) Medición de desplazamiento en eje z-z

- **Calibración de valor de pasos por unidad en MACH3.**
 - La pantalla de inicio del software Mach3 se elige la pestaña con el nombre *settings* como se ve en la figura A3, después la pestaña *set steps per unit*.

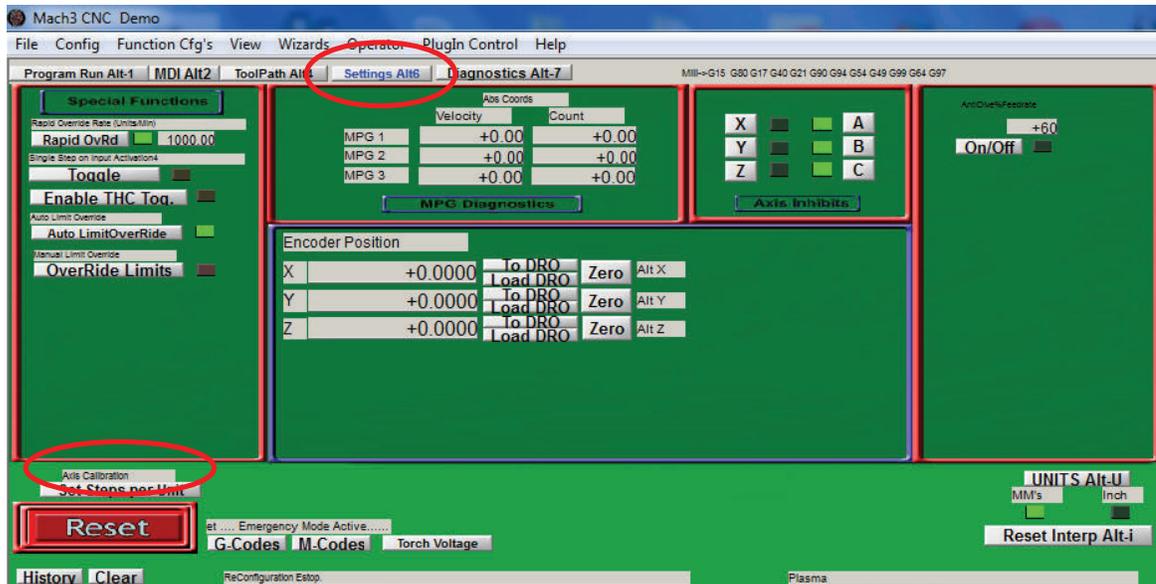


Figura A3. Pantalla de inicio para configurar calibración de ejes.

- Luego se selecciona el eje X-X, como se observa en la figura A4.

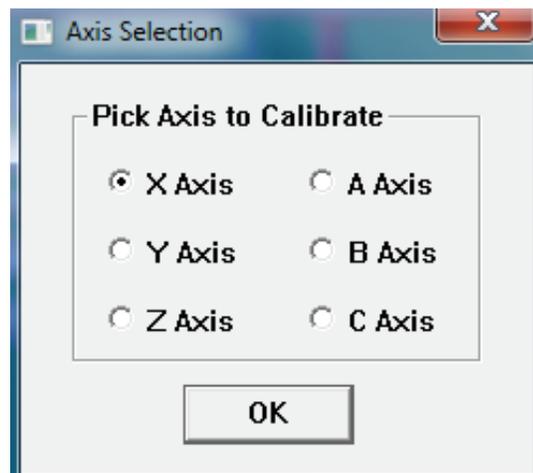


Figura A4. Selección de eje a corregir.

- Y por último ingresa el valor medido, con esto se obtiene un valor de auto calibración. Cabe indicar que los valores calculados en el capítulo 4, son los asignados por el auto calibración, el error se registra en los decimales, con lo que comprueba que los datos calculados son verídicos. En la figura A5, se indica el dato medido para se realice la auto calibración.



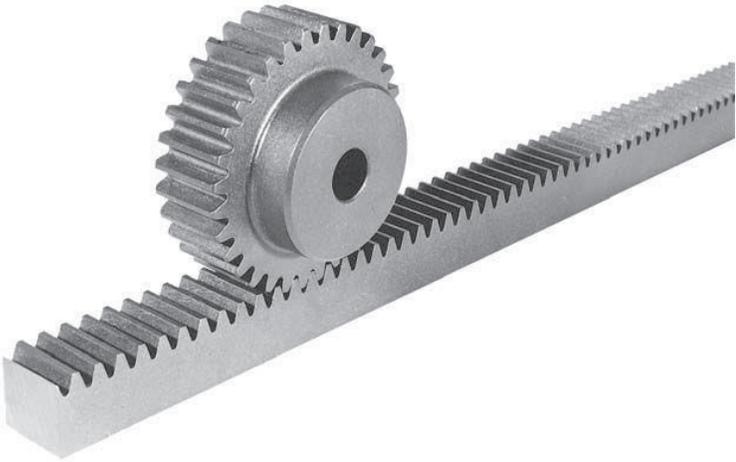
Figura A5. Corrección de valor de auto calibración.

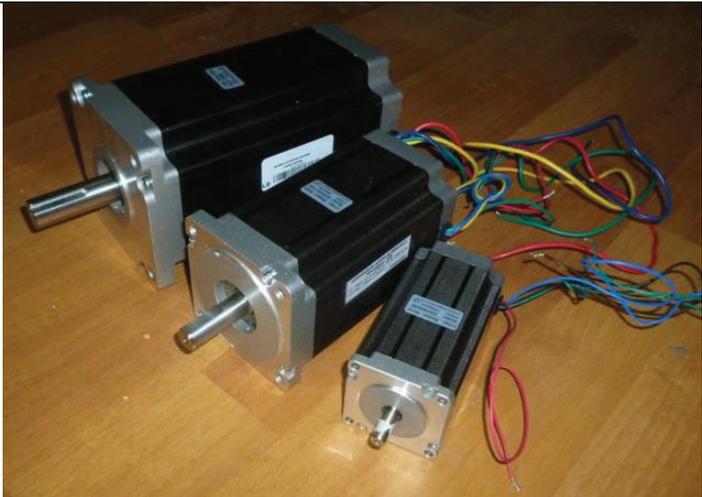
ANEXO 9

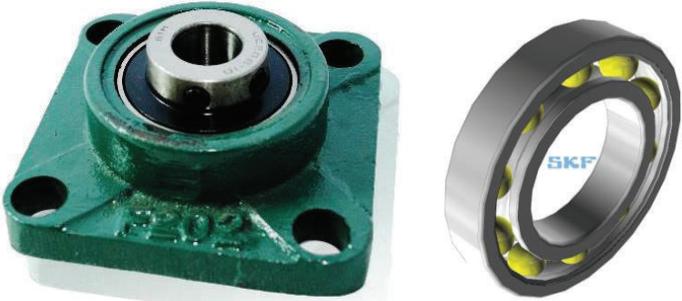
TPM01	GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE	ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA MESA	
		
PROBLEMA	POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
Ruido	Pernos flojos	Reajustar los pernos de la estructura, incluido las peros que sujetan las guías
	Bases flojas	Verificar el ajuste de las bases de apoyo sobre el piso
	Contaminación en elementos móviles	Limpieza de guías por medio de una lija fina, y con un paño limpio utilizar aceite para proteger la guía.
Corrosión	Desprendimiento de capa de protección y aparición de oxidación	Limpiar la zona afecta con lijas, limpiar y aplicar anticorrosivo y volver a pintar la parte afectada.
Vibración	Desalienación	Verificar y alinear las guías Verificar y nivelar la estructura Verificar la uniformidad y firmeza del piso de hormigón
	Bases de apoyo en piso flojas	Revisar el ajuste de las tuercas en los pernos de nivelación
	Instalación de partes con juego excesivo	Revisar y corregir las partes incorrectas sea por falla de instalación o daño
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, overol, zapatos de seguridad, gafas, orejeras, mascarilla	

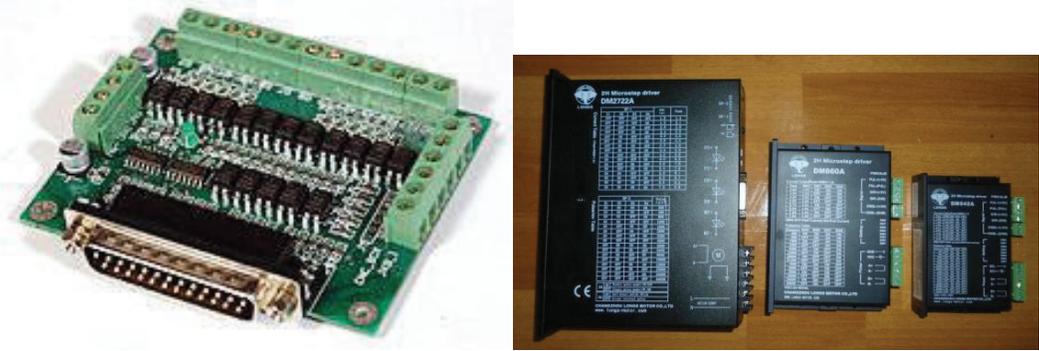
TPM02	GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE	PULSADORES	
		
PROBLEMA	POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
Falta de señal	Falta de ajuste en los terminales de conexión	Ajustar terminal y revisar el cable no este dañado
	Terminales rotos	Cambiar el terminal u ajustar nuevamente
	Palanca dañada	Cambiar el elemento
	Mecanismo interno averiado o contactos rotos	Cambiar el elemento
	Rotura interna de cable	Revisar la continuidad del cable con un multímetro, cambiar el cable roto
	Anclaje de finales de carrera flojos	Reajustar o cambiar los pernos que sujetan este elemento
Las señales se activan de paro y fines de carrera se activan solas	Cortocircuito	Verificar con multímetro los cables de todos los pulsadores
	Contactos auto enclavados o unidos por el uso	Cambiar elemento
	Resortes averiados o remordidos	Cambiar elemento
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, guantes de nitrilo, overol, zapatos de seguridad, gafas, orejeras	

TPM03		GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE		GUÍAS	
			
PROBLEMA		POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
Ruido	Sonido continuo	Rotura de rodamiento en ruedas	Cambio de rodamiento Revisar ajuste del rodamiento. Alojamiento desgastado
		Falta de lubricante	Lubricar las superficies en contacto
		Superficie de rodadura con contaminantes incrustados	Limpieza de guías por medio de una lija fina, y con un paño limpio. Utilizar aceite para proteger la guía.
		Desalienación de guías	Cambio del elemento si este presenta deformación
		Desgaste de patines o ruedas	Cambio del elemento
	Sonido intermitente	Desalienación de guías	Alinear guías en los sectores que se presenta el ruido
		Juego entre guías y ruedas	Cambiar elementos desgastados
Aumento de temperatura	Exceso de lubricante	Reducir la cantidad de lubricante en el rodamiento, verificar ficha de rodamiento para colocar la cantidad necesaria según el régimen de trabajo	
	Lubricante inadecuado	Usar lubricante según la recomendación del fabricante	
	Guías desalineadas	Alinear guías y verificar que estén paralelas	
	Instalación incorrecta	Utilizar herramientas adecuadas, revisar ajustes y tolerancias.	
Giro oscilante del eje de las ruedas o patines	Desalienación entre ejes de las mismas ruedas	Verificar que los ejes sean colineales	
	Ejes torcidos	Cambio de ejes	
	Instalación incorrecta	Revisar el ajuste e instalación de elementos de anclaje de ruedas	
Equipo de protección personal o de seguridad necesario		Guantes de cuero, overol, zapatos de seguridad, gafas, orejeras, mascarilla	

TPM04	GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE	PIÑONES Y CREMALLERAS	
		
PROBLEMA	POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
Ruido	Acoplamiento no adecuado entre los dientes	Revisar y ajustar la base de los motores Verificar que la distancia al centro del piñón este de acuerdo a la geometría de los elementos
	Lubricación inadecuada	Lubricar con grasa recomendada castrol 4020/220-2 TM
	Desgaste	Sustituir elemento desgastado
	Dientes rotas	Sustituir el elemento dañado
	Falta de lubricación	Lubricar las superficies
Golpeteo intermitente	Cremalleras separas en uniones	Verificar que las cremalleras estén bien acopladas
Golpeteo continuo	Mecanismo no se mueve	Revisión de dientes caso contrario cambio de piñón Revisar torque sea adecuado para el movimiento de partes
	Concentración de carga	Alineación de elementos, revisar ejes no contengan deflexión
Incremento de temperatura	Lubricación inadecuada	Cubrir con una fina capa los dientes de los elementos de utilizar por ejemplo el lubricante castrol 4020/220-2 TM
	Desalienación de elementos	Alinear elementos
Atascamiento de mecanismo	Eje del motor gira libre	Cambio de chaveta, revisar ajuste de montaje en motor con piñón
	La distancia del centro de giro no es adecuada	Verificar que la distancia al centro del piñón este de acuerdo a la geometría de los elementos
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, guantes de nitrilo, overol, zapatos de seguridad, gafas, orejeras, mascarilla	

TPM05	GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE	MOTORES	
		
PROBLEMA	POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
El motor no gira, no tiene para de retención	Falta de voltaje en la red	Controlar la tensión de red y cableado de conexión de red
	Líneas del motor interrumpidas	Controlar el cableado del motor Verificar la continuidad de los cables de alimentación al motor Verificar que la señal en los controladores
El motor gira en sentido erróneo	Bobinas del motor invertidas	Conectar correctamente las fases del motor
Motor no gira	Cortocircuito externo	Revisar la bornera de conexiones
	Cortocircuito en bobinado	Cambiar el elemento
Ruido	Falla de rodamientos	Cambio de rodamientos, revisar alineación
	Sistema de acoplamiento sueltos	Ajustar acoples de los ejes
Aumento de la temperatura	Rodamientos en mal estado	Cambio de rodamientos del motor
	Voltaje elevado	Revisar el suministro eléctrico
	Desalienación	Comprobar alineación y asegurar el amarre del motor apretando la fijación
	Instalación incorrecta	Utilizar herramientas adecuadas, revisar ajustes y tolerancias entregada por fabricante
Giro oscilante del eje	Desalineación	Verificar la alineación del eje del motor
	Ejes torcidos	Cambio de motor revisar apriete entre eje de motor y cremallera
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, overol, zapatos dieléctricos, gafas, orejeras, mascarilla	

PM06		GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE		RODAMIENTOS Y CHUMACERAS	
			
PROBLEMA		POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
Ruido	Sonido fuerte	Carga muy pesada	Revisar ajuste entre eje y pista de rodamiento, corregir la posición del asiento en el alojamiento
		Instalación incorrecta	Utilizar equipo adecuado para instalar, calentador de inducción, casquillos de montaje, llaves de gancho y para desmontar extractor de rodamientos, revisar la alineación de los ejes de los elementos de los mecanismos, utilizar alineadores laser de ser posible
		Falta de lubricante o inadecuado	Lubricar Aplicar el lubricante adecuado
		Contacto no adecuado con las partes girantes	Revisar las precargas de los rodamientos, es decir ajuste entre eje y pistas de rodamientos.
	Sonido fuerte y constante	Abolladuras, oxidación o excoriaciones en la pista	Cambio de rodamientos Revisar las condiciones del medio, revisar el lubricante sea el adecuado
		Cavidad	Sustituir el rodamiento
		Descamación	Cambio de rodamiento, revisar las condiciones de trabajo si están bajo contaminación
	Sonido intermitente	Juego excesivo	Revisar si el eje cumple con las condiciones de montaje y ajustes del rodamiento
		Penetración de partículas ajenas	Revisar que la superficie de rodamiento y eje no se encuentren rayados. Cambio de rodamiento si no cumple condiciones de trabajo, revisar que el medio no esté contaminado, revisar estado de retenedores Reemplazar lubricante
		Descamación en los elementos rodante	Cambio de rodamiento si es necesario, revisar condiciones de trabajo, revisar si el medio no está contaminado
Aumento de temperatura	Exceso de lubricante	Reducir la cantidad de lubricante, Aplicar condiciones recomendadas por el fabricante	
	Lubricante inadecuado	Aplicar según la ficha del fabricante.	
	Carga anormal	Revisar los ajustes del rodamiento entre eje y pista interna	
El lubricante cambió de color	Lubricante apto	Cambio de lubricante, revisar el tipo de lubricante es el recomendado por el fabricante.	
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, guantes de nitrilo, overol, zapatos de seguridad, gafas, orejeras, mascarilla		

TPM07	GUÍA DE MANTENIMIENTO	
PARTE	CONTROLADORES Y TARJETAS	
		
PROBLEMA	POSIBLE FALLA	SOLUCIÓN
No se activan	Corto circuito en líneas de entrada	Revisar cables de entrada y fuente de alimentación
	Cables rotos	Revisar los cables desde la fuente a la tarjeta y reemplazar los dañados
	Elementos electrónicos quemados	Reemplazar elementos dañados
Falta de señales de control	Mal ajuste de terminales	Reajustar los terminales con destornillador adecuado
Señal de salida inexistente	Cable suelto en el conector del puerto paralelo	Verificar el estado del cable y conectar
	Cable de datos dañado	Reemplazar cables
	Pines en conector rotos	Reemplazar cables de datos
Equipo de protección personal o de seguridad necesario	Guantes de cuero, overol, zapatos dieléctricos, gafas, orejeras, mascarilla	

ANEXO 10

MANUAL DE USO

Para el uso de equipo se debe considerar los pasos que indican en la figura A6. En la tabla A1 se muestra el ejemplo para una pieza propuesta.

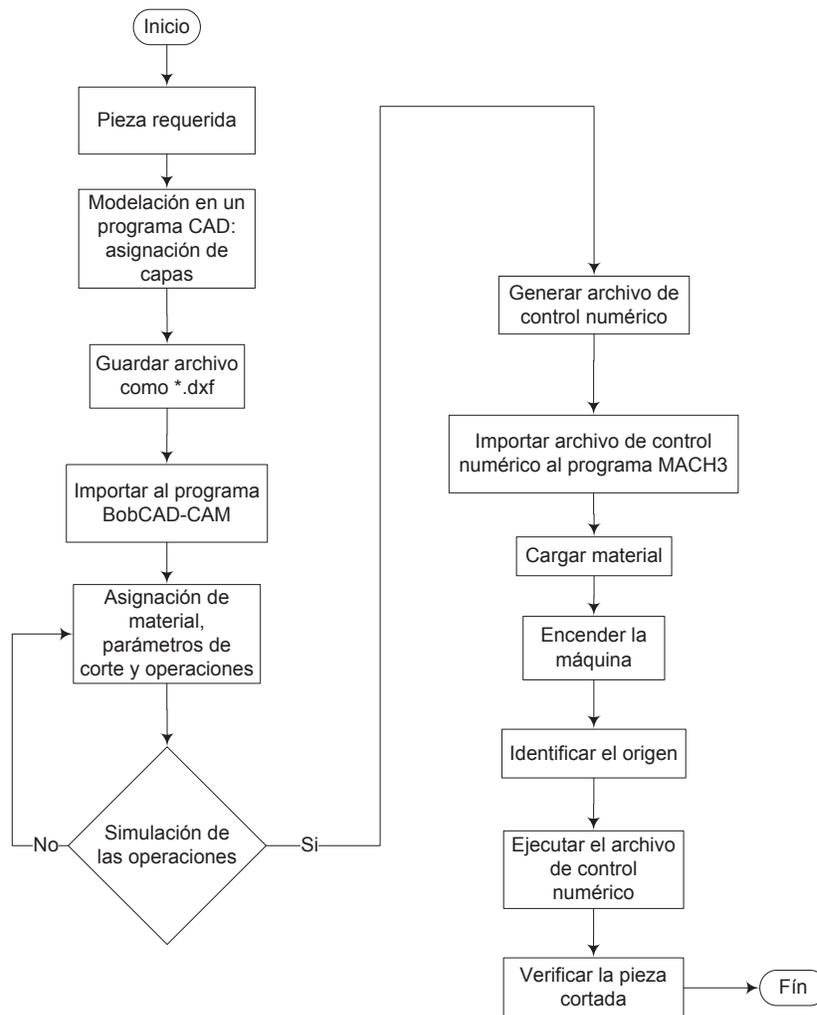
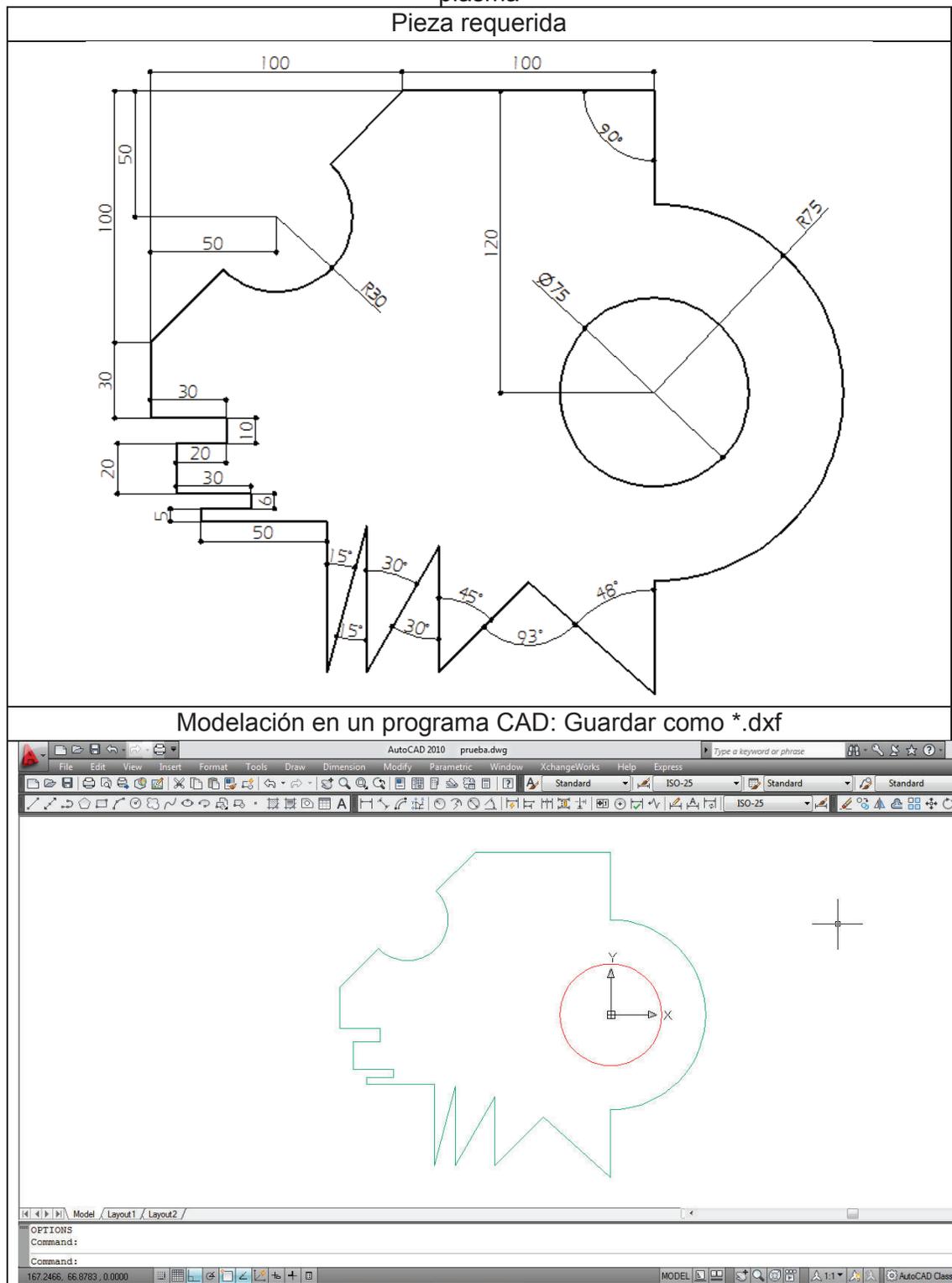
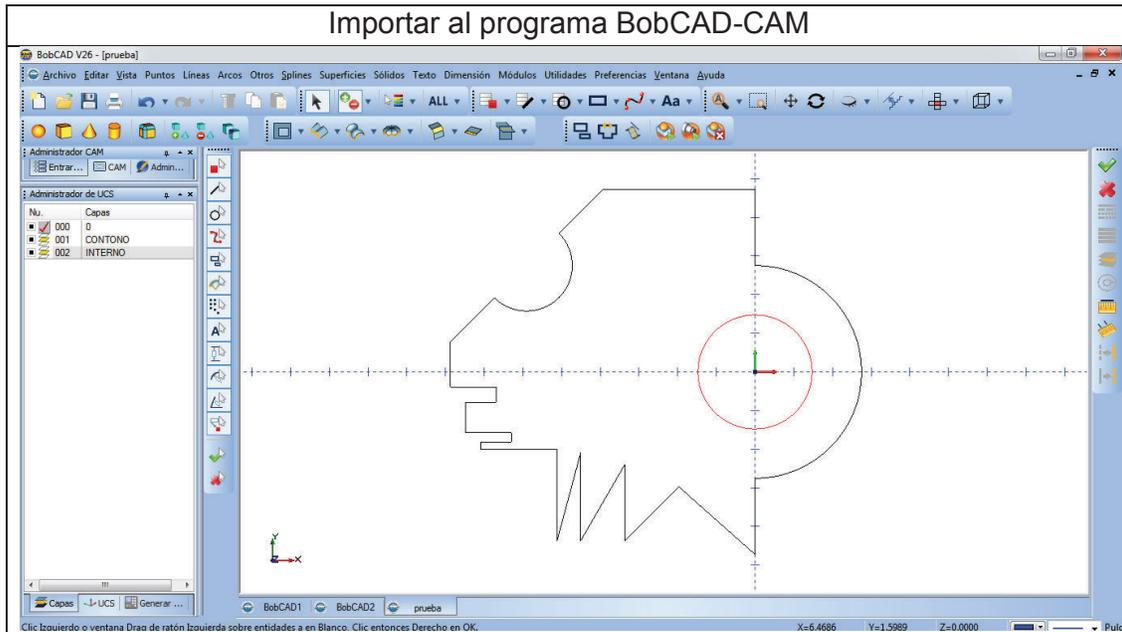


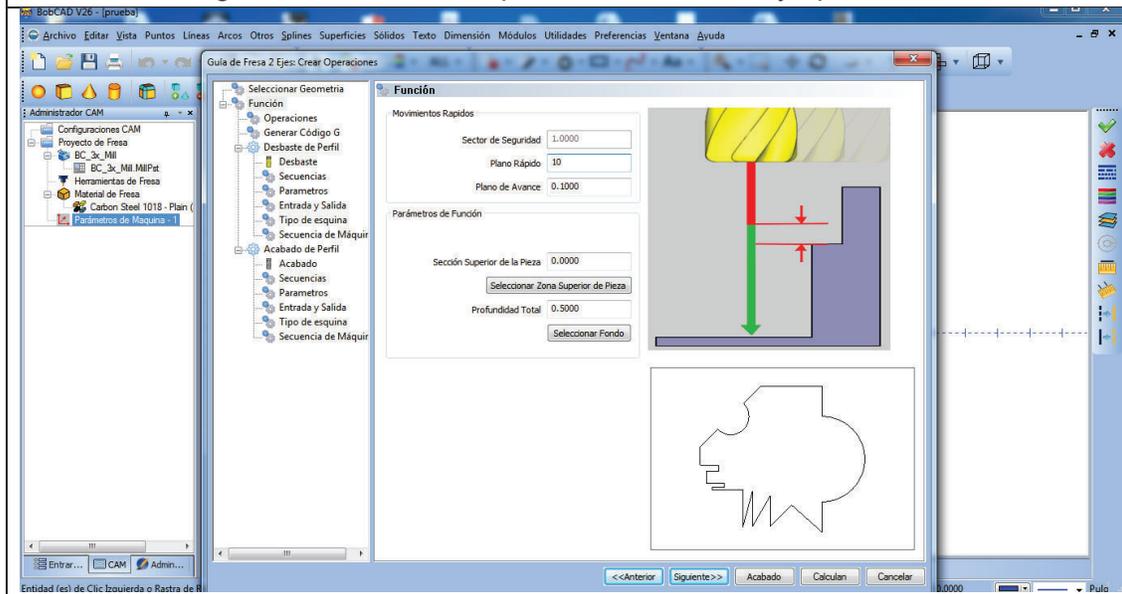
Figura A6. Proceso para el uso del equipo.

Tabla A1. Ejemplo de aplicación para el uso de la máquina de corte mediante plasma





Asignación de material, parámetros de corte y operaciones

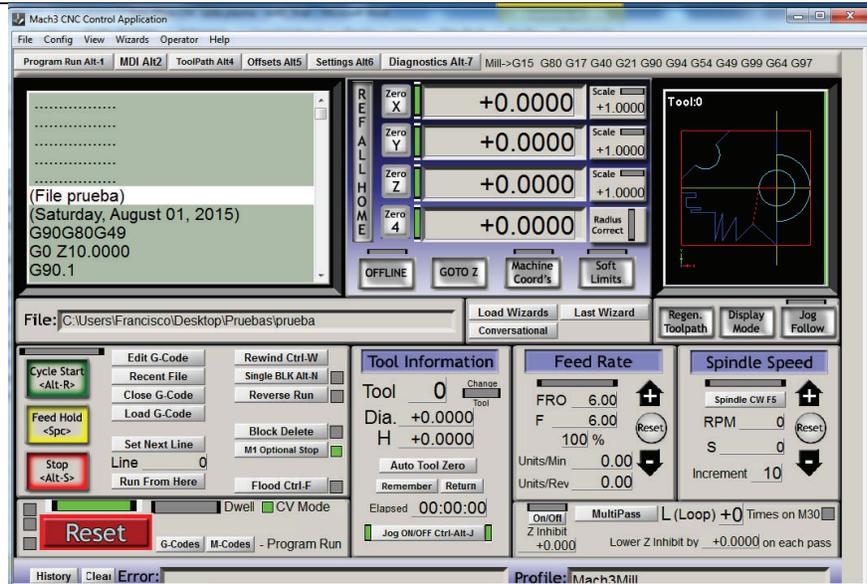




(File prueba)
 (Saturday, August 01, 2015)
 G90G80G49
 G0 Z10.0000
 G90.1
 G0 Z20.0000
 G0 X-37.5000 Y0.0000
 F5000.000
 G1 Z0.0000
 G2 X-37.5000 Y0.0000 I0.0000 j0.0000
 G0 Z10.0000
 G0 X-50.0027 Y-75.5096
 G1 Z0.0000
 G1 X-85.4931 Y-111.0000
 G1 X-85.4931 Y-60.8090
 G1 X-114.4709 Y-111.0000
 G1 X-114.4709 Y-53.0445
 G1 X-130.0000 Y-111.0000
 G1 X-130.0000 Y-51.0000
 G1 X-180.0000 Y-51.0000

G1 X-180.0000 Y-46.0000
 G1 X-160.0000 Y-46.0000
 G1 X-160.0000 Y-40.0000
 G1 X-190.0000 Y-40.0000
 G1 X-190.0000 Y-20.0000
 G1 X-170.0000 Y-20.0000
 G1 X-170.0000 Y-10.0000
 G1 X-200.0000 Y-10.0000
 G1 X-200.0000 Y20.0000
 G1 X-171.2132 Y48.7868
 G3 X-128.7868 Y91.2132 I-150.0000
 J70.0000
 G1 X-100.0000 Y120.0000
 G1 X0.0000 Y120.0000
 G1 X0.0000 Y70.0000
 G2 X-0.0000 Y-70.0000 I-0.0000
 J0.0000
 G1 X0.0000 Y-120.0000
 G1 X-50.0027 Y-75.5096
 G0 Z20.0000
 M30

Importar archivo de control numérico al programa MACH3



Encender la máquina

Identificar origen

Ejecutar el archivo de control numérico

Verificar la pieza cortada

ANEXO 11

- *Planos de fabricación*
- *Planos de montaje*