



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA
ROBÓTICO CARTESIANO PARA CORTE DE MADERA CON
UN ESPESOR DE HASTA 8 mm MEDIANTE UNA
HERRAMIENTA LÁSER PARA LA EMPRESA EDIMCA.**

AUTORES:

**GALARZA BRAVO, JUAN BERNARDO
REINOSO HIDALGO, LINCOLN ISRAEL**

DIRECTOR: ING. PAZMIÑO, FRANCISCO

SANGOLQUÍ

2016



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO PARA UN CORTE DE MADERA CON ESPESOR DE HASTA 8 mm MEDIANTE UNA HERRAMIENTA LÁSER PARA LA EMPRESA EDIMCA**" realizado por: JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO y LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO y LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO para que lo sustenten públicamente.

Quito, 18 de diciembre del 2015

ING. JOSE FRANCISCO PAZMIÑO MORALES

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO, con cédula de identidad N° 171875568-7 y LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO, con cédula de identidad N° 171642024-3, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO PARA UN CORTE DE MADERA CON ESPESOR DE HASTA 8 mm MEDIANTE UNA HERRAMIENTA LÁSER PARA LA EMPRESA EDIMCA" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Quito, 18 de diciembre del 2015

JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO

C.C.:1718755687

LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO

C.C.:1716420243



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO y LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO PARA UN CORTE DE MADERA CON ESPESOR DE HASTA 8 mm MEDIANTE UNA HERRAMIENTA LÁSER PARA LA EMPRESA EDIMCA" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Quito, 18 de diciembre del 2015

JUAN BERNARDO GALARZA BRAVO

C.C.:1718755687

LINCOLN ISRAEL REINOSO HIDALGO

C.C.:1716420243

DEDICATORIA

Este gran logro en mi vida va dirigido a mi Dios, a mis padres cuyo ejemplo siempre se forjó como mi guía para llegar al éxito, mis hermanos que sin ellos y su apoyo las amarguras no se hubieran convertido en momentos de dicha y a mis abuelos por regalarme de su tiempo, cariño y cuidado.

Juan.

Quiero dedicar este triunfo a Dios y la Virgen María quienes han sido fundamentales en el transcurso de mi vida quiero que sepan que sin ellos y su ayuda jamás lo hubiese logrado.

Dedico de manera muy especial a mi Madre y a mi Hermano por haberme apoyado durante todos mis estudios, también quiero mencionar a mi tío Pablo quien ha sido como un padre para mí y sin su apoyo jamás podría haber logrado culminar esta meta, a mi Familia quienes siempre han sido incondicionales y fueron quienes siempre me dieron fuerza y ánimo para continuar.

Lincoln.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de manera infinita a Dios y la Virgen María por jamás habernos dejado solos y por habernos acompañado siempre no solo en nuestra vida estudiantil sino también durante toda nuestra vida.

A nuestros Padres por brindarnos lo mejor y por habernos apoyado siempre en cada una de nuestras decisiones ya que sin ellos nunca hubiésemos llegado a culminar este sueño. A nuestros familiares quienes siempre confiaron en nosotros porque fueron ellos los que siempre nos dieron fuerza para continuar, fueron ellos el motivo y la razón para seguir.

Al ingeniero Francisco Pazmiño quien infundió sus conocimientos llenos de sabiduría, los mismos que fueron parte fundamental para culminar el más grande logro de nuestras vidas.

A la empresa EDIMCA que nos brindó su apoyo incondicional para plasmar nuestra idea de manera efectiva.

INDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE GENERAL	vii
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xiv
INDICE DE ECUACIONES	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	xix
JUSTIFICACIÓN	xx
OBJETIVOS	xxi
CAPITULO I	1
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	1
1. Antecedentes	1
2. Descripción General	2
a) Sistema mecánico.	3
b) Sistema de láser	3
c) Sistema de reflexión láser.	3
d) Sistema de control.	4
3. Alcance del proyecto	5
4. Materia prima	5
4.1. Composición química de la madera.	5
4.2. Estructura de la madera.	5
4.3. Clasificación de la madera.	6
4.4. Propiedades de la madera.	7
4.5. Derivados de la madera.	8
4.6. Etapas de proceso de combustión de la madera.	9
4.7. Combustibilidad de la madera.....	10
5. Estudio del sistema de corte industrial de madera a través de rayos láser... 11	
5.1. Ventajas de corte industrial de madera a través de láser	12
5.2. Descripción del funcionamiento del tubo láser CO ₂	13
• Composición.....	13
• Producción del haz de láser	13
• Haz de láser	14
5.3. Características del láser	14

•	Monocromaticidad.....	14
•	Coherencia espacial o direccionalidad.....	15
•	Coherencia temporal.....	15
5.3.1.	Clasificación de los rayos láser.....	15
5.3.2.	Procesos de generación del láser.....	16
•	Bombeo.....	16
•	Resonador óptico.....	17
•	Emisión estimulada de radiación.....	17
•	Absorción.....	17
5.3.3.	Tipos de corte láser.....	17
•	Corte por sublimación láser.....	17
•	Corte por fusión láser.....	18
•	Corte por quemado láser.....	18
5.3.4.	Proceso de corte láser en la madera.....	18
5.3.5.	Estudio de corte de láser con combustible gaseoso CO ₂ aplicándolo a diferentes tipos de madera.....	19
5.3.6.	Reacción del corte láser en materiales no metálicos.....	20
a)	Orgánicos.....	20
b)	Inorgánicos.....	21
5.3.7.	Generación de carbonilla en el corte láser.....	21
5.4.	Alimentación.....	22
•	Alimentación Eléctrica.....	22
•	Alimentación a través de gases.....	22
5.5.	Aplicaciones.....	23
5.6.	Parámetros de corte con láser CO ₂	27
a)	Potencia.....	28
•	Coefficiente de acoplamiento.....	28
b)	Velocidad de corte (penetración del láser).....	31
•	Densidad de potencia láser (F ₀).....	32
c)	Gas de corte.....	32
d)	Presión.....	32
e)	Modo de operación continuo o pulsado.....	33
f)	Boquilla.....	33
g)	Distancia focal y profundidad de foco.....	33
h)	Temperatura de trabajo.....	35
5.7.	Tipos de máquinas láser CO ₂	35
6.	Robot de coordenadas cartesianas.....	36
6.1.	Robot cartesiano X-Y.....	37
6.2.	Áreas de trabajo.....	38
6.3.	CAD/CAM para equipos láser.....	39
6.4.	Robot cartesiano con láser.....	40
6.5.	Configuración del sistema robótico cartesiano X-Y.....	41
a)	Mesa coordenada.....	41
b)	Motores a paso.....	45
c)	Tubo láser CO ₂	47
d)	Elementos ópticos.....	47
e)	Sistema de enfriamiento de láser.....	50

f)	Sistema de extracción de gases.....	52
g)	Procesador digital de señales (DSP).....	53
CAPITULO II		54
DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS		54
1.	Sistema mecánico	54
2.	Sistema eléctrico/electrónico.....	74
2.1.	Selección de tubo láser CO ₂	74
a)	Selección de potencia del tubo láser CO ₂ necesario para corte de 8 mm de madera.....	74
b)	Selección de velocidad de corte (penetración del láser).....	76
c)	Temperatura de Trabajo del tubo láser CO ₂ para corte de madera... 78	78
2.2.	Selección de motores a pasos y sus controladores (drivers).....	81
2.3.	Sistema de refrigeración.....	87
2.4.	Alimentación de dispositivos eléctricos.....	87
a)	Alimentación del tubo láser CO ₂	88
b)	Alimentación de motores a pasos.....	89
3.	Sistema de control	89
CAPITULO III.....		91
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....		91
1.	Implementación del sistema mecánico.....	91
1.1.	Proceso de construcción de la estructura de la mesa tipo pórtico.....	91
1.2.	Ensamble de guías lineales.....	96
a)	Rieles para unión	96
b)	Procedimiento de montaje.....	97
c)	Procedimiento para instalación de los patines.....	99
1.3.	Ensamble de sistema de transmisión del eje X.....	100
1.4.	Ensamble de sistema de transmisión eje Y.....	101
2.	Implementación del sistema eléctrico/electrónico.....	104
a)	Conexión del tubo láser CO ₂ a la fuente láser.....	105
b)	Implementación del sistema de reflexión.....	106
a)	Conexión del motor a pasos NEMA 34 a su controlador (driver)... 108	108
b)	Conexión del motor a pasos NEMA 23 a su controlador (driver)... 109	109
3.	Implementación del sistema de control.....	111
CAPITULO IV		113
PRUEBAS DE OPERACIÓN		113
1.	Parámetros de corte.....	113
a)	Parámetros de corte láser CO ₂ en MDF.....	113
b)	Parámetros de corte láser CO ₂ en aglomerado.....	113
2.	Resultados.....	114
a)	Corte láser CO ₂ en MDF de 3 mm de espesor.....	114
b)	Corte láser CO ₂ en MDF de 4 mm de espesor.....	115
c)	Corte láser CO ₂ en MDF de 9 mm de espesor.....	116

a)	Corte láser CO ₂ en aglomerado de 4 mm de espesor.	117
b)	Corte láser CO ₂ en aglomerado de 9 mm de espesor.	118
3.	Análisis de Resultados.	119
3.1.	Corte láser CO ₂ en MDF.	119
a)	Corte láser CO ₂ en MDF de 3 mm de espesor.	119
b)	Corte láser CO ₂ en MDF de 4 mm de espesor.	121
c)	Corte láser CO ₂ en MDF de 9 mm de espesor.	122
3.2.	Corte con láser CO ₂ en aglomerado.	123
a)	Corte láser CO ₂ en aglomerado de 4 mm de espesor.	123
b)	Corte láser CO ₂ en aglomerado de 9 mm de espesor.	124
3.3.	Análisis estadístico.	125
3.4.	Distribución normal de errores.	126
a)	Corte con láser CO ₂ en MDF.	128
b)	Corte con láser CO ₂ en aglomerado.	129
CAPITULO V.....		131
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		131
1.	Conclusiones.	131
2.	Recomendaciones.	132
BIBLIOGRAFÍA.....		133
ANEXOS.....		137

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del proyecto	2
Figura 2. Esquema Funcional de los movimientos de los Ejes.....	3
Figura 3. Ilustración de un tubo láser.....	3
Figura 4. Ilustración Sistema de reflexión láser.....	4
Figura 5. Tarjeta DSP para el control.	4
Figura 6. Estructura de la madera.	6
Figura 7. Descripción de funcionamiento de tubo láser CO ₂	14
Figura 8. Geometría del proceso de corte	19
Figura 9. Maqueta topografica en corcho con corte láser.	23
Figura 10. Edificacion con grabado láser en acrilico.....	24
Figura 11. Premio en crilico con grabado láser.	24
Figura 12. Cubierta de aluminio anodizado con marcado láser.....	25
Figura 13. Diagrama electrico en aluminio anodizado con marcado láser	25
Figura 14. Marco de madera para fotografías con grabado láser.....	26
Figura 15. Rompecabezas de fotografia en acrilico con corte láser.....	26
Figura 16. Cajas de rompecabezas en madera con corte láser	27
Figura 17. Conjunto para sushi y palillos con grabado láser	27
Figura 18. Volumen de material removido durante el corte.	28
Figura 19. Modo pulsado – Modo continuo.	33
Figura 20. Distancia y profundidad de foco.	34
Figura 21. Esquema de un robot cartesiano X-Y	37
Figura 22. Esquema de los elementos principales del robot cartesiano X-Y.....	38
Figura 23. Áreas de trabajo del robot cartesiano X-Y.	38
Figura 24. Diseño y manufactura asistida por ordenador.....	40
Figura 26. Pórtico de dos ejes sobre mesa estática	41
Figura 27. Tipos de módulos lineales.	43
Figura 28. Partes generales de un módulo lineal y sección.	43
Figura 29. Fuerzas y momentos de guía lineal.	44
Figura 30. Sección de modulo lineal de correa dentada.	44
Figura 31. Sección de modulo lineal de husillo.....	45
Figura 32. Esquema Funcional de los Motores.....	46
Figura 33. Ilustración Motor a Pasos.	47
Figura 34. Cabeza de corte láser CO ₂	48
Figura 35. Lente convergente (superior) y divergente (inferior).	49
Figura 36. Enfriador de agua.....	50
Figura 37. Composición de un enfriador de agua.	52
Figura 38. Sistema de extracción de gases.....	52
Figura 39. Vista superior de mesa tipo pórtico X-Y.....	55
Figura 40. Vista superior de mesa tipo pórtico X-Y.	56

Figura 41. Composición de guía lineal de 4 hilos de bolas.....	58
Figura 42. Ángulos de contacto de las 4 hileras de bolas.	59
Figura 43. Direcciones de la carga.....	59
Figura 44. Estructura transportadora de la cabeza láser.....	61
Figura 45. D.C.L de la estructura transportadora de la cabeza láser.....	61
Figura 46. Elementos de una correa dentada.	64
Figura 47. Distribución de tensiones en correa dentada.	64
Figura 48. Ábaco para selección de correas dentadas de perfil curvilíneo.	65
Figura 49. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 1.....	69
Figura 50. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 2.....	70
Figura 51. Geometría del sistema de transmisión del motor al eje.	72
Figura 52. Tubo láser CO ₂ Reci S4.....	81
Figura 53. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 3.....	82
Figura 54. Controlador (driver) CW 8060.	86
Figura 55. Bastidor de mesa tipo pórtico.	91
Figura 56. Armazón ensamblado de la mesa tipo pórtico.....	93
Figura 57. Ensamble de puertas.	93
Figura 58. Puerta de secciones laterales.....	94
Figura 59. Puerta de sección frontal.....	94
Figura 60. Ensamble de puertas para cubierta de mesa tipo pórtico.....	95
Figura 61. Puerta frontal para cubierta de la mesa.....	95
Figura 62. Malla para soporte de material.	96
Figura 63. Montaje de rieles.	96
Figura 64. Montaje con tornillos de sujeción.....	97
Figura 65. Limpieza de la superficie.....	97
Figura 66. Aplicación del riel contra la superficie.....	98
Figura 67. Implementación de tornillos del riel.....	98
Figura 68. Implementación de tornillos de fijación del riel.....	98
Figura 69. Ajuste de tornillos del riel.	99
Figura 70. Instalación del tablero en los patines.	99
Figura 71. Estructura móvil del eje X ensamblada.	101
Figura 72. Implementación del sistema de transmisión del motor a pasos.....	103
Figura 73. Banda implementada a lo largo del eje Y.....	103
Figura 74. Estructura con el acople del sistema de transmisión del eje X e Y.	104
Figura 75. Diagrama de conexión del tubo láser.	105
Figura 76. Representación de haz reflejado en el espejo.	106
Figura 77. Primer espejo del sistema de reflexión.	107
Figura 78. Segundo espejo del sistema de reflexión.....	107
Figura 79. Tercer espejo del sistema de reflexión.	108
Figura 80. Motor NEMA 34 a su controlador (driver).	108
Figura 81. Motor NEMA 23 a su controlador (driver).	109
Figura 82. Suministro de agua destilada al enfriador de agua	111

Figura 83. Esquema de conexión de dispositivos electrónicos con la tarjeta DSP.	112
Figura 84. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 3 mm.....	119
Figura 85. Medidas de un cuadrado cortado en MDF de 3 mm.	120
Figura 86. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 4 mm.....	121
Figura 87. Medidas de un cuadrado cortado en MDF de 4 mm.	121
Figura 88. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 9 mm.....	122
Figura 89. Medidas de cuadrado cortado en MDF de 9 mm.....	122
Figura 90. Medidas de circunferencia cortada en aglomerado de 4 mm.	123
Figura 91. Medidas de un cuadrado cortado en aglomerado de 4 mm.	124
Figura 92. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 3 mm.....	124
Figura 93. Medidas de un cuadrado cortado en aglomerado de 9 mm.	125
Figura 94. Ejemplo de distribución normal de mediciones de voltaje.....	126
Figura 95. Distribución normal de errores.....	127
Figura 96. Distribución normal de errores de plano X en MDF.	128
Figura 97. Distribución normal de errores de plano Y en MDF.	128
Figura 98. Distribución normal de errores de plano X en aglomerado.....	129
Figura 99. Distribución normal de errores de plano Y en aglomerado.....	130

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Gases producidos en la madera en funcion de la temperatura	10
Tabla 2. Parametros de láser CO2 aplicándolo a diferentes tipos de madera	20
Tabla 3. Energías de compensación promedio para corte láser de CO2	30
Tabla 4. Propiedades físicas de la madera	31
Tabla 5. Capacidades de carga de serie EGH de HIWIN.....	60
Tabla 6. Capacidades de carga de serie HGH de HIWIN	63
Tabla 7. Valores de C1 según el tipo de instalación	66
Tabla 8. Valores de C2 según la relación de transmisión	67
Tabla 9. Valores de C3 según el tipo de funcionamiento.....	67
Tabla 10. Características de correa	74
Tabla 11. Potencia y coeficiente de acoplamiento de diferentes tipos de madera	76
Tabla 12. Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de 6 mm ...	77
Tabla 13. Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de 7 mm ...	78
Tabla 14. Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de 8 mm ...	78
Tabla 15. Tabla de temperatura de superficie con diámetro de 6 mm	79
Tabla 16. Tabla de temperatura de superficie con diámetro de 7 mm	80
Tabla 17. Tabla de temperatura de superficie con diámetro de 8 mm	80
Tabla 18. Características de tubo láser CO2	80
Tabla 19. Selección de tubo láser CO2	81
Tabla 20. Características de motores a pasos	84
Tabla 21. Selección de motor NEMA 23	85
Tabla 22. Selección de motor NEMA 34	85
Tabla 23. Selección de enfriador de agua	87
Tabla 24. Selección de fuente de alimentación de tubo láser CO2.....	88
Tabla 25. Selección de tarjeta DSP	90
Tabla 26. Equipo de manufactura para construcción de la mesa de tipo pórtico.....	92
Tabla 27. Equipo de manufactura para construcción de la transmisión del eje X .	100
Tabla 28. Equipo de manufactura para construcción de la transmisión del eje Y .	102
Tabla 29. Equipo de medida para la implementacion del sistema eléctrico/electrónico	104
Tabla 30. Definición de los terminales de la fuente láser	106
Tabla 31. Parámetros de corte en MDF.....	113
Tabla 32. Parámetros de corte en aglomerado	113
Tabla 33. Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 3 mm	114
Tabla 34. Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 3 mm	115
Tabla 35. Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 4 mm	115
Tabla 36. Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 4 mm	116
Tabla 37. Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 9 mm	116
Tabla 38. Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 9 mm	117

Tabla 39. Cálculo de error en corte de una circunferencia en aglomerado de 4 mm	117
Tabla 40. Cálculo de error en corte de un cuadrado en aglomerado de 4 mm	118
Tabla 41. Cálculo de error en corte de una circunferencia en aglomerado de 9 mm	118
Tabla 42. Cálculo de error en corte de un cuadrado en aglomerado de 9 mm	119

INDICE DE ECUACIONES

Ec. 1. Potencia del tubo láser CO ₂	29
Ec. 2. Variación de temperatura	30
Ec. 3. Velocidad de corte del láser	31
Ec. 4. Densidad de potencia láser	32
Ec. 5. Tamaño mínimo del punto focal.....	34
Ec. 6. Diámetro de haz focalizado.....	34
Ec. 7. Temperatura de trabajo del tubo láser CO ₂	35
Ec. 8. Tiempo necesario para determinar la temperatura del material	35
Ec. 9. Potencia de motor a pasos.....	46
Ec. 10. Potencia corregida	65
Ec. 11. Par de carga lineal 1	69
Ec. 12. Par de carga lineal 2.....	70
Ec. 13. Longitud de la correa	73
Ec. 14. Par de carga lineal 3.....	82
Ec. 15. Momento de inercia de la polea 1.....	83
Ec. 16. Suma de inercias del sistema de transmisión	83

RESUMEN

El presente proyecto de investigación describe los principales aspectos de diseño y construcción de un sistema robótico cartesiano que recorre a lo largo de los ejes X e Y portando un tubo láser CO₂. Este haz de láser es generado en el tubo a través de una excitación eléctrica que reacciona con gases de CO₂ que se encuentran comprimido en el tubo, la reacción se convierte en energía en forma de luz o fotones. Su función principal es la de realizar cortes en cualquier tipo de madera. Los diseños son realizados en un software CAD/CAM compatible con una tarjeta DSP que se la selecciona a través de un análisis de funcionalidad y disponibilidad, así como el sistema de control se obtiene de un análisis de selección a través de cálculos pertinentes al caso, para determinar los elementos del sistema eléctrico como del sistema mecánico, fundamentando el requerimiento de la empresa EDIMCA. La petición realizada por la empresa EDIMCA estipula que el recorrido longitudinal sea de 1300 mm, el recorrido transversal sea de 2500 mm y el que el láser sea capaz de cortar un espesor de hasta 8 mm para cualquier madera. Para cubrir el área necesaria se tiene una estructura ergonómica y un sistema de seguridad de manera que el operario se sienta cómodo y seguro al momento de realizar su trabajo. De la misma manera se tiene un tubo láser con la potencia necesaria de 100 W, para cubrir sus funciones de corte en tiempo y velocidad, obteniendo buenos índices de producción.

PALABRAS CLAVE:

- **TUBO LÁSER CO₂.**
- **HAZ DE LÁSER.**
- **ROBOT CARTESIANO.**
- **TARJETA DSP.**
- **CORTE DE MADERA.**

ABSTRACT

This project describes the main design and construction of a cartesian robot system, which runs along of X and Y axis with a CO₂ laser tube.

The laser is generated in the inner part of the tube through electrical excitation of the photons, which react with the compressed gas in the tube. The reaction turns into energy in form of light or photons. Its main function is to perform cuttings on wooden boards up to 8 mm thickness. Designs to be cut are developed in a CAD/CAM software compatible with a DSP card, which is selected by doing of functionality and availability analysis. The control system is obtained with a selection analysis through calculations in accordance to this particular case to determinate the elements of the electrical and mechanicals systems; this comes from the EDIMCA's requirements.

EDIMCA set as requirements that the size of the cutting area must be approximately 1300 x 2500 mm. Additionally, the system must be able to cut 8 mm thickness. A protection lid was designed to protect operators from accidents, and the system works only if the lid is closed. A laser of 100 W was chosen to fulfill the requirements asked by EDIMCA. Tests showed that the machine was able to cut according to the required specifications; this getting an optimal performance.

KEYWORDS:

- **CO₂ LASER TUBE.**
- **LASER BEAM.**
- **CARTESIAN ROBOT.**
- **DSP CARD.**
- **WOODEN CUT.**

INTRODUCCIÓN

Para el presente proyecto de investigación, se desarrolla de manera muy práctica el diseño de una máquina de mecanizado con láser que permite realizar cortes en madera de 8mm de espesor que sean personalizados por el usuario, de manera que sus productos sean de buena calidad.

El desarrollo de diseños con láser requiere de un proceso especial a través de un contacto con la superficie del material (madera) de índole térmica, su desarrollo se da a partir de un haz de láser generado por un tubo, este haz de láser elimina el material a través de vaporización permitiendo que el material se desintegre sin sufrir cambios físicos ni químicos, al cortar el material presenta un acabado sin rastros de viruta, un ligero porcentaje de carbonilla, mejor precisión y acabado superficial.

El corte por láser resulta de una tecnología que provoca un haz de láser de alta potencia que actúa sobre la superficie del material (madera) a través de un sistema de espejos que se encargan de reflejar el láser hasta una cabeza de láser en la cual se encuentra una boquilla que lleva una lente de enfoque convergente.

La tarjeta DSP toma un punto fundamental en el sistema de control de la máquina ya que se controla desde los motores a pasos como la potencia de corte, velocidad, movimientos del cabezal a través de un sistema CAD/CAM.

Es importante trabajar a velocidades de corte altas ya que así se obtendrán acabados impecables en el momento de realizar cortes de alta precisión, tomando en cuenta que al ejecutar el sistema CAM se evitan los procesos de limpieza que se desarrollan en otras aplicaciones de corte.

JUSTIFICACIÓN

La EMPRESA DURINI INDUSTRIA DE LA MADERA C.A. (EDIMCA), tiene la necesidad de realizar cortes de diferentes diseños en madera con un tamaño estándar de 2.5 m x 1.3 m y un espesor máximo de 8 mm, para lo que se propuso un sistema con láser, ya que disponen de una máquina que realiza cortes, pero esta no es capaz de realizar cortes curvos y tampoco es capaz de sujetar madera delgada ya que sus ventosas no son capaces de realizar dicha acción.

Como solución se propuso el sistema robótico cartesiano a láser con una potencia capaz de realizar el corte necesario, para que desempeñe trabajos de corte en cualquier tipo de madera con espesores de hasta 8mm, con el cual el operario a través de software CAD/CAM podrá diseñar gran variedad de formas, figuras, imágenes etc.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Construir un sistema Robótico cartesiano CNC con una herramienta láser, para corte de madera con un espesor de hasta 8 mm, a través de un software capaz de ejecutar diferentes formas propuestas por el cliente de la empresa.

Objetivos específicos

- Desarrollar un proceso de corte adecuado a las características o propiedades físicas de la madera.
- Diseñar una estructura mecánica ergonómica para el corte de madera.
- Obtener resultados de corte convenientes para la satisfacción de los clientes de la empresa.
- Seleccionar componentes idóneos para complementar el sistema robótico cartesiano.

CAPITULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1. Antecedentes

A mediados de los años 30, a muy temprana edad Juan Manuel Durini Palacios empezó a trabajar en el mundo de la madera, como comprador de productos necesarios para la construcción de obras, que su padre el Arquitecto Francisco Manuel Durini llevaba a cabo.

El desarrollo de la Empresa Durini continuó a pesar de importantes contratiempos que perjudicaron el negocio, como fue un devastador incendio en su aserradero y luego la difícil situación ocasionada por la Segunda Guerra Mundial que hacía muy difícil la adquisición de maquinaria, incursionando incluso en la fabricación y venta de parquet mosaico.

El 28 de Julio de 1964 Empresa Durini se transforma en EDIMCA (Empresa Durini Industria de Madera, C.A.) en constitución con sus socios fundadores Juan Manuel Durini Palacios y Federico Arteta Rivera. Contando con dos locales (San Bartolo y Cordero), fábrica de parquet mosaico y un centro de distribución en Quito.

Hoy, EDIMCA posee 24 locales propios a nivel nacional, cinco franquicias y más de ciento cincuenta distribuidores, dos Centros de Distribución, quinientos empleados y atiende al mercado artesanal, del diseño y la construcción con productos variados y de alta calidad; convirtiéndose en la empresa líder en comercialización de estos productos en Ecuador. (Edimca, 2015)

Ecuador se encuentra entre los 10 países de mayor biodiversidad del mundo, parte de esta riqueza constituyen sus bosques en el cual crecen alrededor de 5000 especies arbóreas.

El 42,9 % de la superficie de Ecuador está cubierta por bosques, representa 11.6 millones de hectáreas de los cuales el 99% es bosque nativo. Al momento las

principales especies plantadas son eucalipto, pino, balsa, pachaco, teca, cutanga y laurel.

La creciente oferta de muebles de hogar, oficina, puertas, marcos para puertas, ventanas, pisos, anaqueles de cocina y otros, que impulsan empresas transformadoras del país, determinan que la empresa EDIMCA S.A. aglutine una gran proporción de producción nacional.

Aun siendo las condiciones favorables en las que se desenvuelve el sector, es necesario superar los bajos niveles de competitividad, productividad, calidad, innovación y transferencia de tecnología del sector productivo nacional y local, razón por la cual es necesario impulsar la implementación de sistemas automatizados en EDIMCA S.A. (EDEC, 2015)

2. Descripción General

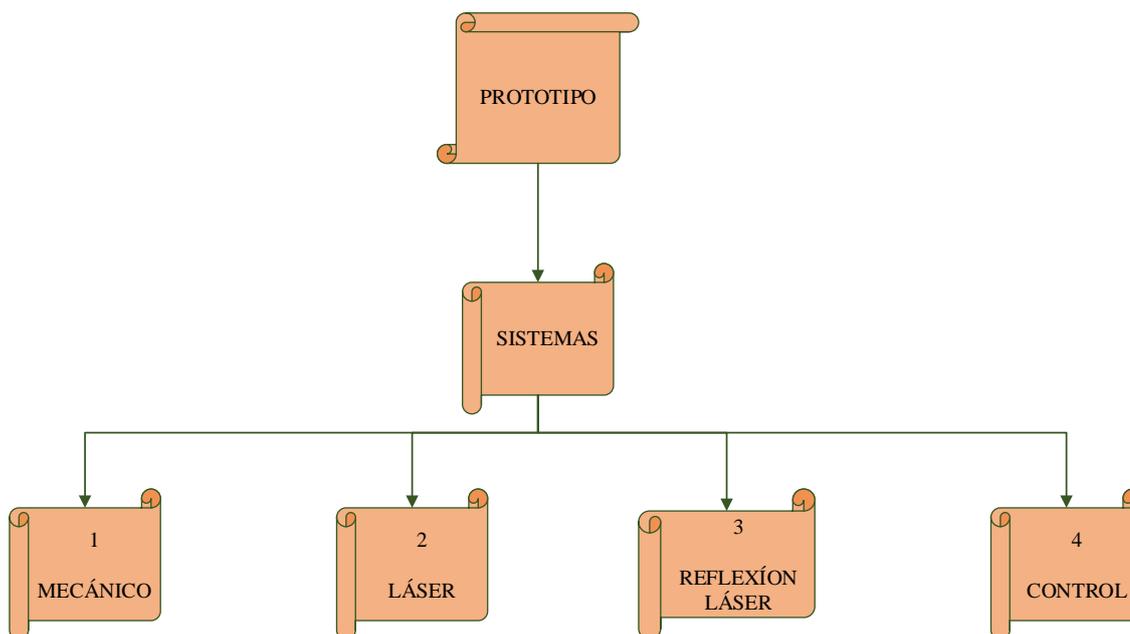


Figura 1. Diagrama de bloques del proyecto

El sistema robótico cartesiano está compuesto de 4 partes fundamentales:

a) Sistema mecánico.

Este sistema cuenta con una adecuada estructura para el control de posiciones específicas en los ejes ortogonales “X” y “Y”, estos ejes serán móviles de manera que se posicionan en diferentes puntos, los mismos que corresponden a una zona o área de trabajo específica según las características planteadas.



Figura 2. Esquema Funcional de los movimientos de los Ejes

Fuente: (Direct Industry, 2015)

b) Sistema de láser

Este sistema está conformado por un tubo generador de láser cuya alimentación principal es a base de CO₂, estos tubos suelen ser de gran dimensión y su potencia varía según el tipo de aplicación.



Figura 3. Ilustración de un tubo láser.

c) Sistema de reflexión láser.

Su sistema es muy sencillo y está conformado por dos lentes reflectores y una boquilla, los lentes se encuentran posicionados en los ejes “X” y “Y” los cuales son

móviles, de manera que estos espejos reflejen el láser hacia la boquilla que se encargara de amplificar la luz de láser en un eje “Z”.

El láser proveniente de la boquilla es el encargado de realizar el corte en la madera.



Figura 4. Ilustración Sistema de reflexión láser.

d) Sistema de control.

Su sistema de control está basado en una interfaz humano-máquina (HMI) por el cual se manipula los motores paso a paso encargados del desplazamiento de sus ejes, este control puede ser tanto manual como automático.

Para el **control manual** se manipula direcciones para los ejes “X” y “Y”.

Para el **control automático** se utiliza un software CAD en el cual se carga el diseño de una imagen que se desee cortar, por lo que al ingresar el diseño en el sistema HMI, este inicia el proceso de corte de manera automática.



Figura 5. Tarjeta DSP para el control.

Fuente: (Shenzen, 2015)

3. Alcance del proyecto

La máquina está destinada a la producción de cortes curvos y lineales de madera con espesores de hasta 8 mm. Se utiliza un láser generado con CO₂ lo cual facilita el trabajo con ciertos materiales como la madera

El requerimiento de la empresa EDIMCA es que los cortes en madera se los pueda realizar hasta con un espesor de 8 mm y el área de la plancha sea de 1.3m x 2.5m.

4. Materia prima

La materia prima utilizada en el proyecto es la madera que puede obtenerse de los troncos de los árboles, también de las ramas y las raíces. La madera se utiliza en algunas presentaciones como: lámina, chapa fina y macizo para obras de carpintería. (Wolfgang, 2000, p.19)

4.1. Composición química de la madera.

De conformidad con la composición química de la madera se puede distinguir entre parte leñosa, sustancia, jugo y protoplasma. La sustancia de madera está compuesta en todas las maderas de carbono elemental (aproximadamente el 50 %), hidrogeno (6 %), oxigeno (43 %), nitrógeno y pequeñas cantidades de componentes de las cenizas (1 %). Los componentes esenciales de la madera son la celulosa (aprox. un 40 %), sustancias semejantes a la celulosa (entre 24 % y 32 %) y lignina (entre 22 % y 30 %).

Además de los componentes principales, la madera contiene también otros secundarios (como un 6 %). Pertenecen a estos últimos las sustancias orgánicas tales como resina, trementina, grasa, cera, colorantes y otras, y las sustancias inorgánicas tales como potasio, sodio, calcio, magnesio, ácido fosfórico, óxido de hierro y otras. (Wolfgang, 2000, p.27)

4.2. Estructura de la madera.

La Madera está constituida por una aglomeración de células tubulares de forma y longitud variables. En un corte transversal se puede apreciar diversas zonas: (fig.6)

- **Medula y radios medulares:** Es la parte central y se forma por secado. Forma un cilindro en el eje del árbol y está constituida por células redondeadas que dejan grandes meatos en sus ángulos de unión.
- **Duramen:** Es la parte inmediata a la medula o corazón, formado por madera dura y consistente impregnada de tanino y de lignina.
- **Albura:** La albura es la madera joven, posee más savia y se transforma con el tiempo en duramen al ser sustituido el almidón por tanino, que se fija en la membrana celular, volviéndola más densa e imputrescible.
- **Cambium:** Es la capa generatriz, que se encuentra debajo de la corteza formada por células de paredes muy delgadas que son capaces de transformarse por divisiones sucesivas en nuevas células, formándose en la cara interna células de xilema o madera nueva, y en la externa líber o floema.
- **Corteza:** Su misión es la protección y aislamiento de los tejidos del árbol de los agentes atmosféricos. (Construpedia, 2015)

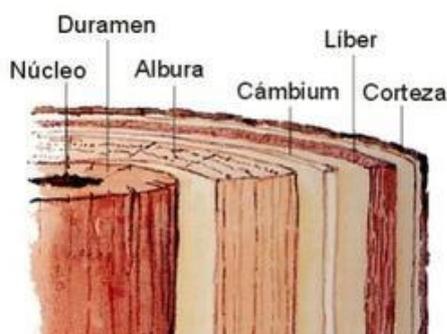


Figura 6. Estructura de la madera.

Fuente: (Chemalnero, 2012)

4.3. Clasificación de la madera.

La madera puede clasificarse de varias formas, en función de sus propiedades:

- Según su dureza (clasificación más habitual)

- Según su humedad

En función de su dureza se distinguen 2 grandes grupos:

- Maderas Blandas: Proceden, en general, de las coníferas y resinosas.
- Maderas Duras: Proceden de árboles de hoja caduca

En función del grado de humedad, se tiene:

- Maderas Verdes: grado de humedad alto (30 – 35 %).
- Maderas Desecadas: (10 – 12 %).
- Maderas Secas: (3 %). (Construpedia, 2015)

4.4. Propiedades de la madera.

Las propiedades de la madera se pueden clasificar en 3 tipos: físicas, mecánicas y especiales.

Entre las propiedades físicas, que son las propias de la madera, se destaca:

- *Higroscopia*: la madera es capaz de aumentar y disminuir su contenido en agua en función de la temperatura ambiente. Por ello, sus propiedades dependen del porcentaje de humedad.
- *Densidad*: es la relación que existe entre la masa y el volumen de un cuerpo. La densidad de la madera es menor que la del agua, por lo que flota en ella.
- *Dureza*: la dureza es la resistencia que opone la madera a ser desgastada, rayada o clavada.
- *Flexibilidad*: propiedad de la madera de deformarse en el sentido de su longitud, sin romperse ni deformarse de forma permanente.
- *Hendibilidad*: facilidad que presentan las maderas para partirse en el sentido de sus fibras o vetas.

Las propiedades mecánicas dependen del tipo de madera y de su grado de humedad. Indican el comportamiento de la madera ante distintos tipos de esfuerzos (cortadura, tracción, flexión y compresión).

Entre las propiedades especiales de la madera, podemos destacar:

- Inflamabilidad: capacidad para arder con facilidad. la madera es un material inflamable.
- Flotabilidad: capacidad para no hundirse en el agua. La madera flota.
- Conductividad térmica: la madera seca es buena conductora del calor.
- Conductividad eléctrica: la madera seca es buen aislante eléctrico.
- Conductividad acústica: la madera es buena conductora del sonido.
(Chemalnero, 2012)

4.5. Derivados de la madera.

Los derivados de la madera no se obtienen directamente del corte de los troncos, sino a partir de virutas, láminas o fibras de distintos tipos de maderas. Entre estos derivados se encuentran las maderas prefabricadas y los materiales celulósicos.

a) Maderas prefabricadas.

- Tableros contrachapados.
- Tableros aglomerados.
- Tableros de fibras.

b) Materiales celulósicos.

- Papel.
- Cartón. (Chemalnero, 2012)

4.6. Etapas de proceso de combustión de la madera.

En la combustión se distinguirá varias etapas básicas:

- *Calentamiento*: inducido por la reacción en cadena o por aporte exterior, y según que materiales, estos tratan de cambiar de estado (funden, reblandecen, etc.) antes de entrar en la siguiente fase. Según el nivel de exposición alcanzado, incluso pueden darse fenómenos reversibles.
- *Descomposición*: la energía proporcionada por la reacción en cadena ya en marcha, rompe enlaces atómicos y se crean nuevos productos de la combustión. Cada material tiene diferente grado de descomposición en función de la temperatura a la que se ve sometido. Esta fase ya es irreversible.
- *Ignición*: los gases inflamables formados en la descomposición contactan con el oxígeno atmosférico hasta alcanzar el denominado punto de ignición, pudiendo arder con llama externa. El punto de ignición es la temperatura a la cual se inicia la combustión. En este punto, el calor generado por la oxidación supera al empleado en la desintegración y al que se pierde hacia el exterior.

El punto de incendio es la temperatura a la cual la mezcla se mantiene ardiendo tras la retirada de la llama externa y suele ser un poco más lenta que la anterior. El punto de autoignición es la temperatura a la cual el material empieza la combustión viva sin necesidad de una activación externa, sirviendo la temperatura generada en su propia reacción de oxidación previa como energía de activación.

- *Propagación de la llama*: En los gases de descomposición pueden darse la presencia de los denominados radicales libres que contribuyen a acelerar la formación de las llamas. (García, 1996, p.77)

4.7. Combustibilidad de la madera.

A temperaturas inferiores a 100 °C, las alteraciones o reacciones químicas que se producen en la madera son insignificantes. Desde 100 °C a 150 °C las reacciones químicas de la madera y productos derivados de la misma, pueden considerarse despreciables. Entre 150-200 °C empieza la emisión de gases, de los cuales el 70 %, son incombustibles (CO₂) y el 30 % es combustible (CO), consecuencia de reacciones químicas que se ponen de manifiesto al oscurecerse la madera y hasta prácticamente los 175 °C permanecen los gases con la composición anterior constante y el poder calorífico 1200 Kcal/m³.

A partir de 200 °C la producción de CO₂ disminuye, aumenta la de CO, aparecen hidrocarburos combustibles, el poder calorífico de los gases aumenta. Los aumentos señalados se hacen muy rápidamente a partir de los 275 °C, llegando el poder calorífico a 4000 Kcal/m³.

La reacción que hasta entonces era endotérmica empieza a ser exotérmica, por consiguiente, se entra en la zona peligrosa, ya que entre los 220 °C y 260 °C se puede producir la inflamación de los gases, y entonces el balance térmico anterior permite el sostenimiento de la llama (poder calorífico de la madera 4000-4500 Kcal/kg.). La pirolisis de la lignina empieza a los 280 °C y alcanza su máximo a los 350 °C. (Peraza, 1976, p.22)

Tabla 1

Evolución de gases producidos en la madera en función de la temperatura

Temperatura [°C]	Producto gaseoso
150	Secado y tostado
200	Desprendimiento de gases, carbonización.
280	Gases CO ₂ , O, agua.
500	Producción de hidrocarburo C _m H _n .
700	Desecación y formación CO.
900	Producción de hidrogeno.

Fuente: (Peraza, 1976, p.22)

5. Estudio del sistema de corte industrial de madera a través de rayos láser

El doctor Maiman quien creó el primer sistema de rayos láser, utilizando para ello un cristal de Rubí sintético de unos 10 cm de longitud.

El disparo del generador se hace de forma que los electrones pasen a la vez a su posición de equilibrio. En este movimiento el exceso de energía se libera en forma de fotones.

Dada la coincidencia en la fase de la luz emitida puede concentrarse mediante sistemas ópticos standard en puntos de muy pequeña superficie, con una enorme densidad de energía.

Los primeros generadores producían esta radiación de forma pulsante, lo que hacía que la potencia suministrada fuese muy baja, generalmente inferior a 1 [W]. Con esta potencia únicamente podían hacerse pequeñísimos agujeros en la madera (menos de dos milímetros de profundidad y uno de diámetro). De esta forma el interés comercial de un aparato de este tipo para cortar madera era nulo.

La densidad energética que se consigue es enorme, alcanzándose con un generador de 1 [kW]. Enfocando en una superficie con un diámetro de 0.25 mm se obtiene una concentración de 20 [GW/m²]. El manejo de estas energías en forma de luz presenta problemas tecnológicos no fáciles de resolver, especialmente en el enfoque preciso en una pequeña superficie y en utilizar la longitud de onda adecuada a las características de absorción de la sustancia sobre la que incide.

También es importante la profundidad de foco conseguida en el enfoque, especialmente al tratar de cortar elementos gruesos. Si la profundidad de foco es pequeña, el corte será nítido en la superficie enfocada, pero en el interior la vía aumentará de ancho, lográndose cortes en bisel. Estos condicionantes hacen necesario que el equipo productor de radiación láser sea construido especialmente para cada aplicación.

El proceso de corte con láser tiene dos aspectos muy distintos. Se puede producir vaporización instantánea o carbonización de la madera. El que se produzca uno de

estos efectos depende de la concentración de potencia en el punto de corte. El proceso óptimo en el corte es conseguir la instantánea vaporización de la madera en toda la profundidad del corte, siendo tan rápida la transformación de la madera que casi no hay tiempo para que pase el calor al resto de la pieza. La superficie así cortada queda lisa, brillante y sin trazos de carbonización.

El segundo tipo de corte que se ha mencionado y que entraña un cierto grado de carbonización, se produce por una baja densidad de energía en el punto de corte. Entonces el proceso se hace más lento y la energía consumida por unidad de superficie cortada aumenta de dos a cuatro veces. Por lo tanto, el corte por sublimación es el más adecuado, pero para ello se necesita un generador de rayos láser de alta potencia. Debido a esta dificultad la madera se corta con rastros de madera carbonizada, excepto la primera capa que tiene un grueso inferior a 2 mm. (AITIM, 1976, p.1)

5.1. Ventajas de corte industrial de madera a través de láser

- Pequeño desperdicio de madera por producirse una vía de corte pequeñísima.
- No se produce aserrín.
- No se produce desgaste de herramienta ni hay que afilar elementos de corte.
- Puede cortarse en cualquier dirección y describir curvas de cualquier diámetro.
- Pueden cortarse cuñas de madera de ángulo muy agudo.
- El corte puede iniciarse y pararse instantáneamente.
- Pequeño nivel de ruido.
- Las superficies del corte son muy lisas.
- No se producen deflexiones en la madera. (AITIM, 1976, p.2)

5.2. Descripción del funcionamiento del tubo láser CO₂.

- *Composición*

Un láser de CO₂ es un tipo de láser de gas. Se hace pasar la electricidad a través de un gas para producir luz. Un láser de CO₂ tiene un tubo lleno de gas con un espejo transparente en un extremo, lo que significa que es posible el paso de un poco de luz a través de él y de un espejo totalmente reflectante en el otro extremo. Esta mezcla de gas generalmente se compone de dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y helio. El haz producido por un láser de CO₂ es emitido a través del espejo transparente.

- *Producción del haz de láser*

Cuando la electricidad pasa a través de la mezcla de gas, las partículas de nitrógeno se excitan, lo que significa que adquieren más energía. El nitrógeno se usa debido a que puede mantener el estado excitado durante largos periodos de tiempo sin descargar la energía en forma de fotones o luz. Las vibraciones excitadas del nitrógeno ocasionan que el dióxido de carbono se excite también. En este punto se ha logrado la inversión de población, que es el punto en el que un sistema tiene más partículas excitadas que las que no se encuentran en ese estado. Para que el láser produzca un haz de luz, los átomos de nitrógeno deben perder su estado excitado mediante la liberación de energía en forma de fotones. Esto puede lograrse cuando los átomos excitados del nitrógeno se ponen en contacto con los átomos de helio que se encuentran a temperaturas muy bajas, lo cual ocasiona que el nitrógeno genere luz. La luz producida es muy poderosa en comparación con la luz normal debido a que el tubo de gases en un rayo láser está rodeado de espejos, los cuales sirven para reflejar parte de la luz que viaja a través del tubo. Este reflejo de luz causa que las ondas de luz producidas por el nitrógeno sean reforzadas, lo que significa que la luz es amplificada a medida que viaja a través del tubo de gas y solamente sale después de alcanzar cierta intensidad, lo cual la hace extremadamente potente.

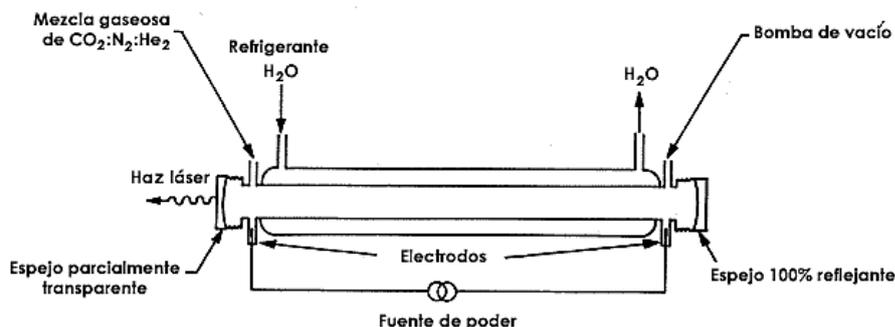


Figura 7. Descripción de funcionamiento de tubo láser CO₂

Fuente: (Mesa, 2008)

- **Haz de láser**

El rayo láser descargado por los átomos de nitrógeno anteriormente excitados se encuentra en la parte infrarroja del espectro. El láser producido con este método es lo suficientemente poderoso como para cortar muchas sustancias y también para destruir otras. Debido a que se encuentra en el espectro infrarrojo tiene una longitud de onda muy larga, de alrededor de 10,6 μm . (Scott, 2015)

5.3. Características del láser

Un láser es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente. La coherencia espacial se corresponde con la capacidad de un haz para permanecer con un pequeño tamaño al transmitirse por el vacío en largas distancias y la coherencia temporal se relaciona con la capacidad para concentrar la emisión en un rango espectral muy estrecho.

Las características de una radiación láser son:

- **Monocromaticidad.**

Emite una radiación electromagnética de una sola longitud de onda, en oposición a las fuentes convencionales como las lámparas incandescentes (bombillas comunes) que emiten en un rango más amplio, entre el visible y el infrarrojo, de ahí que desprendan calor.

- ***Coherencia espacial o direccionalidad.***

La radiación láser tiene una divergencia muy pequeña, es decir, puede ser proyectado a largas distancias sin que el haz se abra o disemine la misma cantidad de energía en un área mayor.

- ***Coherencia temporal.***

La luz láser se transmite de modo paralelo en una única dirección debido a su naturaleza de radiación estimulada, al estar constituido el haz láser con rayos de la misma fase, frecuencia y amplitud. (Mesa, 2008)

5.3.1. Clasificación de los rayos láser

Los rayos láser pueden emitir radiación en un amplio intervalo de longitudes de onda, con potencias o energías de salida muy variables y con una distribución temporal que puede ser continua o en impulsos. Además, las distintas aplicaciones, condicionan el tiempo de exposición, que es un factor clave para determinar el riesgo.

Los distintos grados de peligrosidad han conducido a unas clasificaciones de los equipos láser, promulgadas por distintos organismos mundiales, BRH (Bureau of Radiological Health), ANSI (American National Standards Institute), IEC (International Electrotechnical Commission), BSI (British Standards Institution) y otros. Todas estas clasificaciones son de hecho parecidas.

Así se puede distinguir las siguientes clases:

- *Clase I:* Son aquellos que no son dañinos a partes del cuerpo en principio vulnerables a radiación láser. Un ejemplo de este tipo de láser es el de arseniuro de galio (GaAs), cuyo espectro de emisión va desde 820 a 905 nm.
- *Clase II:* Son aquellos que emiten por debajo de 1 mW de potencia; estos láseres pueden producir daños en la retina cuando inciden directamente, o después de alguna reflexión, sobre el ojo. El equipo debe ir equipado con una luz piloto y un obturador, así como con una etiqueta indicadora de precaución.

- *Clase III:* En esta clase se distinguen dos subclases, la clase III a, y la clase III b. Los láseres de He-Ne de menos de 4 mW se incluyen en la clase III a. Son altamente peligrosos para los ojos, y deben incluir una etiqueta indicadora de precaución. Los de clase III b son aquellos que emiten entre 4 y 50 mW de potencia, y deben ir equipados con una luz piloto, un obturador y una etiqueta indicadora de peligro.
- *Clase IV:* Los láseres de esta categoría son aquellos capaces de emitir grandes potencias, en este grupo podemos encontrar láseres de CO₂, Nd: YAG, Nd: vidrio, entre otros. Estos láseres son muy peligrosos para los ojos y para muchas otras áreas del cuerpo que se vean expuestas un período suficientemente largo, pudiéndose producir quemaduras en la piel. Deben llevar una etiqueta indicadora de peligro, además de un piloto y un obturador.
- *Clase V:* Se trata de láseres de alta potencia. Es una clase reciente en la que la principal característica es que deben quedar siempre confinados, evitando todo tipo de reflejo. Los sistemas de seguridad deben ser revisados periódicamente para garantizar su buen funcionamiento. Deben llevar una etiqueta de peligro en un lugar visible, aunque los peligros para el operario son pequeños al garantizarse su confinamiento. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.51)

5.3.2. Procesos de generación del láser.

Hay cuatro procesos básicos que se producen en la generación del láser, denominados:

- ***Bombeo***

En el láser, el bombeo puede ser eléctrico u óptico, mediante tubos de flash o luz. Puede provocarse mediante una fuente de radiación como una lámpara, el paso de una corriente eléctrica, o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética que provoque una emisión

- ***Resonador óptico***

Está compuesto por dos espejos que logran la amplificación y a su vez crean la luz láser. Dos tipos de resonadores: Resonador estable, emite un único haz láser, y Resonador Inestable, emite varios haces.

- ***Emisión estimulada de radiación***

La emisión estimulada, base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado menos excitado. El estímulo en cuestión proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen.

- ***Absorción***

Proceso mediante el cual se absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable. (Amarilys, 2015)

5.3.3. Tipos de corte láser

Existen 3 tipos de corte por láser y estos son:

- ***Corte por sublimación láser***

La alta intensidad del haz láser vaporiza el material directamente en el punto de trabajo. Luego, por lo general se usa un gas inerte para cortar, o sea, para expulsar el material y generar la ranura de corte. Esta situación se encuentra principalmente restringida al corte de sustancias no metálicas, como madera, papel, cerámica o plástico.

- *Corte por fusión láser*

El material fundido o derretido por el haz láser es expulsado por medio de nitrógeno, generando la ranura de corte. El nitrógeno es inyectado en la boquilla a alta presión (hasta 20 Bar) y al salir de ella por una pequeña perforación de la punta, se convierte en un chorro de alta energía cinética. La fusión láser es particularmente utilizada en el corte de aceros cromo-níquel o aluminio libre de óxido, produciendo superficies de corte metalúrgicamente limpias.

- *Corte por quemado láser*

El haz de láser calienta el material hasta su temperatura de encendido. Aquí se usa oxígeno como gas de corte. Después de alcanzada la temperatura de encendido, el material "se quema" con un chorro de oxígeno, generando una reacción exotérmica. La escoria producida es expulsada por medio del gas de corte generando la ranura de corte. Este proceso es particularmente utilizado para el corte de aceros dulces y en menor escala para cortes de acero inoxidable.

5.3.4. Proceso de corte láser en la madera.

En la técnica de corte mediante láser la extracción de la madera se realiza por sublimación del mismo a lo largo de toda la zona de corte. El calor necesario para conseguir la vaporización viene proporcionado por un sistema constituido por la fuente del haz láser y la boquilla, que incorpora la óptica de focalización y permite el flujo del gas de aporte, acoplado todo ello a un conjunto mecánico que permita el movimiento relativo entre el haz y la pieza a cortar.

La transmisión de calor a la madera se realiza mediante la focalización del haz sobre la superficie, elevando su temperatura hasta su etapa de descomposición. La temperatura de la zona adyacente es algo inferior con lo que sólo se produce la vaporización del material.

Además del haz incidente se utiliza un flujo coaxial de gas de aporte el cual realiza varias funciones: contribuye a la expulsión del material al incidir sobre la superficie de corte a presión, potencia el corte por oxidación en los metales o evita la combustión al crear una atmósfera inerte. El haz focalizado y la corriente de gas de aporte inciden

sobre la cara superior de la superficie a cortar. Parte del haz es reflejado y parte es absorbido. Esta fracción de energía absorbida provoca un aumento de la temperatura, evaporando una zona del material e iniciando así el corte. A partir de este momento, el calor se propaga preferentemente en profundidad hasta atravesar la totalidad del material. El cilindro de material evaporado constituye el llamado frente de erosión.

Concéntricamente a este frente se forma una fina capa de material vaporizado separando la zona de corte del bloque sólido, como puede observarse en la figura 8. Este frente avanza siguiendo el movimiento, trazando la línea de corte. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.91)

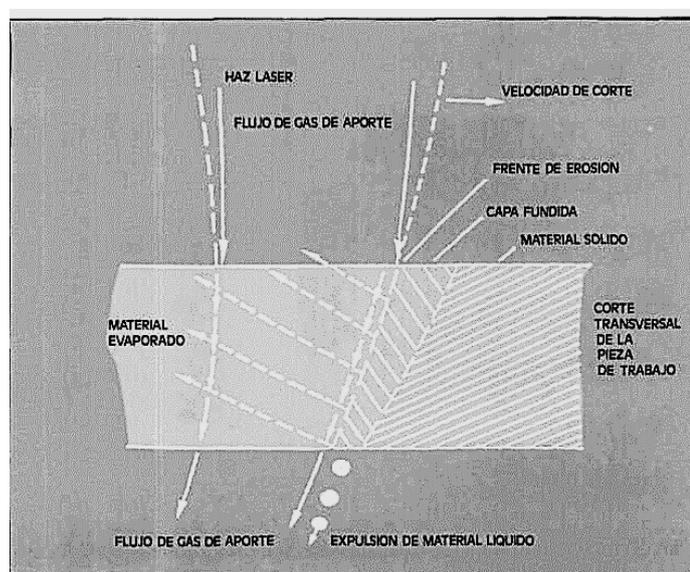


Figura 8. Geometría del proceso de corte

Fuente: (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.91)

5.3.5. Estudio de corte de láser con combustible gaseoso CO₂ aplicándolo a diferentes tipos de madera.

Utilizando una lente de 12.7 mm, con aporte coaxial de nitrógeno, se consiguen ranuras limpias de carbón en el corte de madera de arce laminada y contra placada de 18 mm de espesor.

La madera absorbe la radiación láser casi en su totalidad. Las temperaturas que se alcanzan en la zona de corte son superiores a los 5000 K. La energía absorbida rompe

los enlaces orgánicos del material, de manera que se produce residuos típicos de la combustión de madera, como son carbonilla, alquitranes y algunos hidrocarburos gaseosos, los cuales pueden ser fácilmente extraídos con un aspirador convencional.

La cantidad de residuo formado en el corte depende en gran manera del tipo de madera. Así, al cortar maderas nobles, se observa un ligero oscurecimiento de la zona cortada debido a la combustión producida. Cuando se trata de planchas de madera, formado por capas sucesivas de madera unidas por pegamento de cola, el corte aparece mucho más oscuro, en especial en la zona del pegamento, observándose bandas más claras, correspondientes a las propias capas de madera. Si la pieza a cortar está constituida por aglomerado, en el que la madera en forma de pequeñas astillas y serrín está prensada con cola, el resultado es un corte uniforme y muy oscuro de carbonilla. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.104)

Tabla 2

Parámetros de láser CO₂ aplicándolo a diferentes tipos de madera

Material	Espesor [mm]	Potencia láser [W]	Velocidad de corte [m/min]	Gas de aporte
Madera blanda	25,4	2000	2	Nitrógeno
Madera dura	25,4	2000	1,1	Nitrógeno

Fuente: (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.106)

5.3.6. Reacción del corte láser en materiales no metálicos.

a) Orgánicos

En este campo se pueden incluir los plásticos, maderas, telas, papel, etc. y todos ellos coinciden en no usar nunca como gas de proceso el oxígeno, porque podría provocar una llamarada. En el caso de las maderas, el gas de aporte puede ser aire comprimido de 4 a 6 Bar de presión, que dejará el corte ennegrecido o el nitrógeno que no quemará tanto el frente de corte.

En el caso de los plásticos y todas las variedades que estos poseen, el gas de proceso por norma general será aire, aunque en algunos casos se consiguen mejores cortes con nitrógeno a baja presión (2 a 3 Bar). Hay que tener especial cuidado en el

corte de los plásticos por los vapores generados, ya que algunos plásticos como el PVC dejan partículas de cloro en el aire de un tamaño dañino para el hombre. El mejor truco para conseguir un buen corte, de aspecto casi pulido, en materiales orgánicos, es el empleo de aire comprimido a poca presión y utilizando boquillas con diámetro de 5 a 8 mm. El empleo del láser para el corte de estos materiales es debido al acabado pulido que deja en el frente de corte que evita posteriores pulidos manuales. Para espesores menores de 10 mm, la lente utilizada puede ser 12.7 mm; y para mayores, debe ser 19 mm situado el foco en la superficie o, como máximo, para espesores de más de 10 mm, en la mitad del espesor.

Por último, las telas, papel, etc. casi no requieren aporte de gas y son fáciles de cortar. (Cuesta, 2011, p.54)

b) Inorgánicos

Aquí se pueden incluir los materiales como la piedra, la pizarra, los azulejos, etc. en los que todos ellos comparten como aporte de gas el aire a una elevada presión (8 a 9 Bar) o el nitrógeno (no mejora mucho la calidad del corte) con presiones de 10 a 12 Bar. En estos casos siempre quedan restos de material vitrificados en el frente de corte y probablemente en forma de rebabas que son fácilmente retirables con la mano o cualquier proceso mecánico. En el caso de las pizarras, se ha llegado a cortar 20 mm de espesor sin provocar su quiebra; y en el caso de los azulejos y gres se alcanzan grandes velocidades de corte sin desprender ni gases tóxicos ni sustancias de desecho, como en el caso del corte por agua.

Las lentes utilizadas pueden ser 12.7 o 19 mm, con diámetros de boquilla de 1.4 o 2 mm y situado el foco en la superficie. (Cuesta, 2011, p.54)

5.3.7. Generación de carbonilla en el corte láser.

El láser provoca un aumento de temperatura por encima de la temperatura de sublimación de la madera, en la zona donde se realiza el corte. La madera evaporada se percibe en forma de humo que escapa a alta velocidad por el sistema de extracción del láser. Este humo también evacúa el calor acumulado alejándolo de la madera, lo cual hace que el material sólo esté sometido a una carga térmica relativamente

baja cerca de la zona donde se produce el corte. Un enfoque preciso, así como la elección de la lente adecuada y el suministro de aire comprimido, permiten obtener cortes de alta calidad. En muchos casos, el borde de color parduzco o ennegrecido puede usarse de forma creativa. (Trotec, 2015)

5.4. Alimentación.

Su alimentación se basa a través de varios componentes y estos son:

- ***Alimentación Eléctrica.***

El tubo láser de CO₂ se puede alimentar de tres formas diferentes, cada una con sus ventajas e inconvenientes:

- a) Simplemente conectando la salida de alta tensión alterna (20 kV) del transformador a los electrodos del tubo. Esta forma es sencilla, pero adolece de poco rendimiento y baja potencia láser de salida que además es pulsada a 100 Hz. No obstante, funciona.
- b) Se rectifica la salida del transformador mediante un simple puente rectificador de onda completa, hecho con 4 diodos de los que usan los hornos microondas. Se obtiene de esta forma una corriente continua pulsatoria, pero de buen rendimiento.
- c) Se rectifica la salida del transformador mediante un puente rectificador de onda completa, pero además se filtra mediante condensadores y resistencia de alisado.

- ***Alimentación a través de gases.***

Este láser usa como medio activo una mezcla de 3 gases, CO₂, N₂ y He en una proporción de 10, 15 y 75% respectivamente. Esta mezcla de gases debe circular y renovarse constantemente por el tubo de descarga durante su funcionamiento. Por tanto, el gas solamente es usado una vez durante su recorrido por el tubo de descarga hacia el exterior. (R.D.X, 2008)

5.5. Aplicaciones.

El grabado, marcado y corte de superficies, son procesos que industrial y artesanalmente pueden ser realizados al aprovechar la tecnología láser o los equipos de haz de luz de CO₂.

Los equipos láser pueden ser utilizadas para realizar grabados, marcados y cortes sobre casi todo tipo de superficies como metales, maderas, cartones, cueros, fieltros, telas, cartulina impresa, papel, vinilo, metacrilato, plásticos, PVC, forex, pet, poliuretano de alta densidad, porexpan, espumas, esponjas, laminas imantadas, caucho etc. Su funcionamiento es similar al de una impresora convencional, con la diferencia que, en vez de realizar una impresión a base de tinta, realizan una diminuta excavación, marca o penetración en el material soporte, a través de un rayo láser, para reproducir así, fielmente, una imagen, fotografía o dibujo.

En el mercado tanto en el campo industrial como artesanal existen, máquinas para transformar diferentes materiales y para distintas aplicaciones. (Castro, 2010, p.84)

- *Modelado Arquitectónico.*

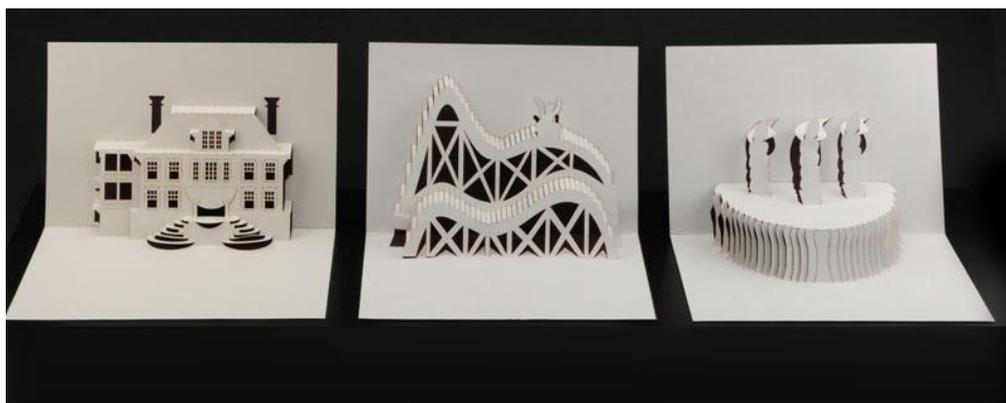


Figura 9. Maqueta topografica en corcho con corte láser.

Fuente: (teknoartes, 2015)

- *Arte tecnológico.*



Figura 10. Edificación con grabado láser en acrílico.

Fuente: (teknoartes, 2015)

- *Reconocimiento y premios en acrílico.*



Figura 11. Premio en acrílico con grabado láser.

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Piezas automotrices*



Figura 12. Cubierta de aluminio anodizado con marcado láser.

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Paneles de control*

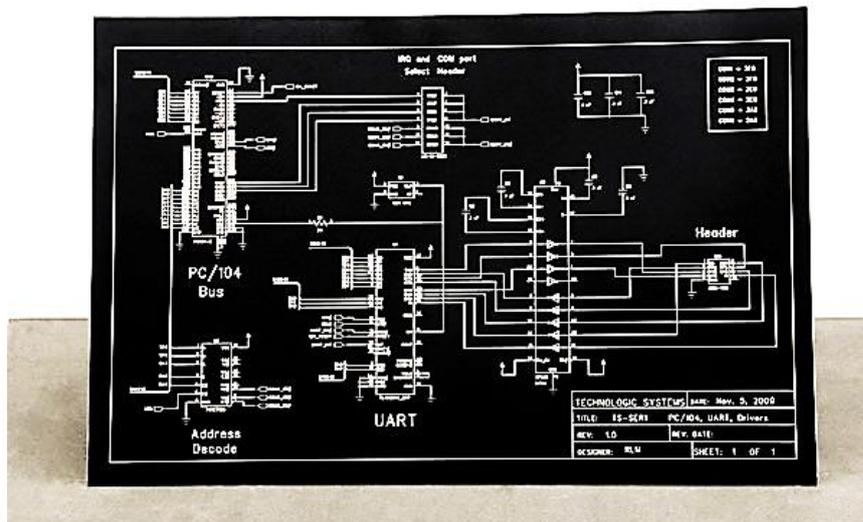


Figura 13. Diagrama electrico en aluminio anodizado con marcado láser

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Portaretratos*

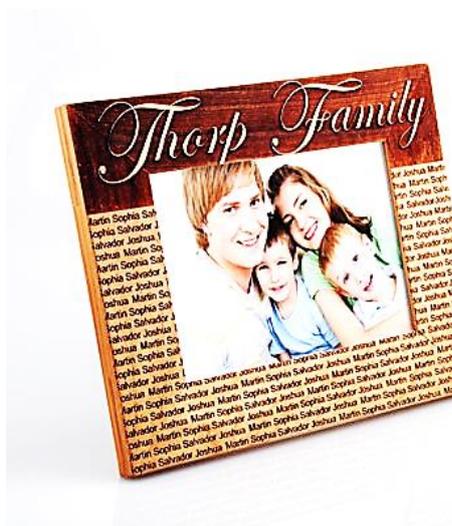


Figura 14. Marco de madera para fotografías con grabado láser

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Esculturas y rompecabezas con fotografías*



Figura 15. Rompecabezas de fotografía en acrílico con corte láser

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Trabajo en madera personalizado*



Figura 16. Cajas de rompecabezas en madera con corte láser

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

- *Incrustaciones en madera*



Figura 17. Conjunto para sushi y palillos con grabado láser

Fuente: (Universal laser systems, 2015)

5.6. Parámetros de corte con láser CO₂

Estos parámetros son importantes ya que en esto se invierte grandes cantidades de dinero y tiempo para hacer más eficaces sus resonadores, aumentar las potencias de

trabajo e intentar incorporar nuevos sistemas al proceso de corte que faciliten el mecanizado o incluso posibiliten el corte de otros materiales o espesores mayores.

a) *Potencia*

Parámetro que posibilita el corte de un material. La forma en que dicha potencia se suministra a la pieza en el tiempo puede ser de forma continua o pulsada.

Así tenemos la ecuación necesaria para el corte de materiales a través de láser, la misma que dependerá tanto de su capacidad calorífica, velocidad de penetración por sublimación y espesor del material. (Cuesta, 2011, p.39)

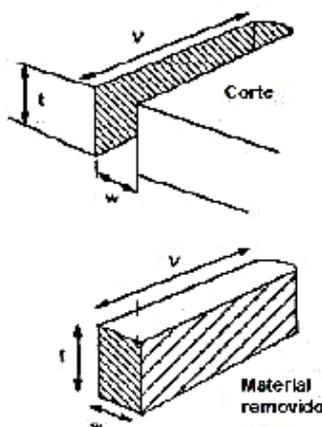


Figura 18. Volumen de material removido durante el corte.

Fuente: (Steen, 1991, p.76)

- *Coefficiente de acoplamiento.*

El coeficiente de acoplamiento de un material es un factor dependiente de la temperatura, así como del grado y de la dirección de polarización del haz cuando éste incide oblicuamente sobre la superficie del material.

Una vez la energía de la onda ha sido absorbida por el material, se produce un aumento de su temperatura. Este aumento no se limita a las zonas donde incide el haz, sino que se difunde hacia las zonas adyacentes. Para relacionar el aumento de temperatura de cualquier punto del material con la potencia absorbida, se debe tener

en cuenta factores como el calor específico, la conductividad térmica y los calores latentes de cambio de estado, parámetros todos ellos propios del material.

En el proceso de la transferencia de energía al material intervienen varios factores como el enfoque del haz, el estado superficial del material, el régimen en que opera el láser y el aporte de gas.

El coeficiente de absorción en la madera es bajo y aumenta con la longitud de onda, pudiéndose encontrar zonas muy absorbentes según la naturaleza del material y su elevado coeficiente de acoplamiento. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.59)

$$\eta P = wtV * \rho [C_p \Delta T + L_f + m' L_v] \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P = potencia incidente	[W]
w = ancho de corte medio	[m]
t = espesor	[m]
V = velocidad de corte	[m/s]
C _p = Capacidad calorífica del sólido	[J/kg°C]
ρ = densidad del sólido	[kg/m ³]
m' = fracción de masa fundida vaporizada	
L _f = calor latente de fusión	[J/kg]
L _v = calor latente de vaporización	[J/kg]
ΔT = variación de la temperatura que causa la vaporización	[K]
η = coeficiente de acoplamiento	

Tabla 3

Energías de compensación promedio para corte láser de CO₂.

Material	Valor más bajo P/Vt [MJ/m²]	Valor más alto P/Vt [MJ/m²]	Valor promedio P/Vt [MJ/m²]
Pino (amarillo)			23
Roble			26
Caoba			24
Madera prensada			23
Madera contrachapada	20	65	31

Fuente: (Steen, 1991, p.78)

Como punto importante, en el caso de maderas se tendrá que tanto calor latente de fusión como de vaporización no son considerables. Esto se debe a que la madera no cambia de estado sólido a líquido (calor latente de fusión) o líquido a gaseoso (calor latente de vaporización).

También se toma en cuenta el hecho de que la variación de temperatura (Δt) es:

$$\Delta t = T_f - T_o \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Ec. 2

Donde:

T_f = Temperatura final del sólido.

T_o = Temperatura inicial del sólido.

La temperatura final es considerada como la temperatura en la que la madera comienza a descomponerse, presentando así un desprendimiento de gases y carbonización de la madera para esto a través de la teoría presentada anteriormente la madera llega a una temperatura de 200 °C como se muestra en la tabla 1.

Tabla 4**Propiedades físicas de la madera.**

Material	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg°C)]	Conductividad térmica [W/mK]	Difusividad térmica (X 10 ⁻⁶) [m ² /s]
Pino (amarillo)	650	1298	0,16	0,19
Roble	850	2386	0,21	0,10
Caoba	560	1340	0,13	0,11
Madera	600	1380	0,14	0,17
Madera contrachapada	250	1600	0,1	0,1

Fuente: (Miliarium Aureum, 2004)

b) Velocidad de corte (penetración del láser).

Esta será la que una vez conseguida la vaporización del material, ocasiona el arrastre del canal de corte, por ejemplo, se puede haber vaporizado el material base y por una excesiva velocidad provocar solo un calentamiento de la pieza sin llegar a cortar. (Steen, 1991, p.72)

$$V = \frac{F_0}{\rho[L + C_P(T_V - T_0)]} \quad [m/s] \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

V = Velocidad de corte [m/s]

F₀ = Densidad de potencia láser [W/m²]

ρ = Densidad del sólido [kg/m³]

L = Calor latente de fusión y vaporización [J/kg]

C_P = Capacidad calorífica del sólido [J/kg°C]

T_V = Temperatura de vaporización o desintegración [°C]

T₀ = Temperatura inicial del material [°C]

La temperatura de vaporización o desintegración, es la temperatura en la cual la madera finaliza su proceso de combustión, en dicho proceso la madera pasa por varias fases según su temperatura, en estos se presencia la vaporización de diferentes gases que se descomponen del material, cuando la temperatura se acerca a 900 °C se empieza a producir hidrogeno como se muestra en la tabla 1.

- ***Densidad de potencia láser (F_O)***

Es la magnitud de concentración de energía (potencia por unidad de área del rayo láser). Determina la tasa de penetración en el tejido y el grado de vaporización, de forma que un alto valor de F_O produciría vaporización y un valor bajo de F_O produciría coagulación. (Rioja, Allepus, & Rioja, s.f)

$$F_O = \frac{P \times 10^6}{\pi r^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

F_O = Densidad de potencia láser. [W/m²]

P = Potencia incidente. [W]

r = radio del haz de láser en el foco [mm]

c) Gas de corte

Juega un papel principal, pues es el encargado de desalojar el material evaporado. Es importante señalar que un inadecuado suministro del aporte del gas ocasionaría un mal acabado de corte, bien por no ser estable el flujo de aporte, o bien por no estar repartido uniformemente a la salida por la boquilla. (Cuesta, 2011, p.42)

d) Presión

Debido a que cada material tiene sus propiedades, y dentro de cada material existen distintos espesores, cada una de las posibilidades demandara una presión distinta del gas de corte seleccionado.

e) Modo de operación continuo o pulsado.

Hace referencia a como el resonador suministra el haz láser, en forma de una onda continua, modo continuo (CW), o en forma discontinua, mediante pulsos.

Generalmente los láseres pueden emitir en continuo (CW) o pulsado, obteniéndose, normalmente, las mayores velocidades de corte lineal con el láser operando en modo CW.

La calidad del corte cuando se trabaja con altas potencias disminuye cuando se utiliza el modo CW.

La potencia pico, en modo pulsado, puede oscilar entre 1 – 10 kW, con una duración de pulso de 1 – 3 ms (según espesor a procesar). (Bermejo, 2007, p.6)

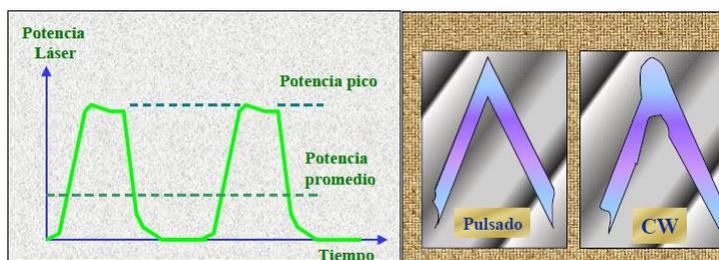


Figura 19. Modo pulsado – Modo continuo.

Fuente: (Bermejo, 2007, p.6)

f) Boquilla.

Este elemento se define por el diámetro de salida, dado en milímetros y fija el flujo de gas que saldrá por la boquilla, ya que, para una misma presión, si aumenta el diámetro de la boquilla aumenta el caudal del gas y lógicamente el gasto de gas. (Cuesta, 2011, p.39)

g) Distancia focal y profundidad de foco.

La distancia focal de las lentes determina el tamaño del haz en el foco. El tamaño mínimo del punto focal (d) es una función de la longitud de onda de la radiación láser

(λ), del modo del haz (factor de calidad del haz, k), el diámetro del haz sin focalizar (D) y la distancia focal de la lente (f), y viene dado por la expresión:

$$d = \frac{4 \times \lambda \times f}{\pi \times D \times K} \quad [mm] \quad \text{Ec. 5}$$

Para llevar a cabo la focalización del haz se utilizan lentes o espejos. Una relación práctica que nos permite calcular el diámetro del haz focalizado es:

$$D_f = \frac{4 \times f \times \lambda}{\pi \times D_1} \quad [mm] \quad \text{Ec. 6}$$

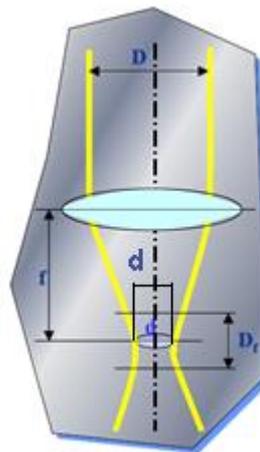


Figura 20. Distancia y profundidad de foco.

Fuente: (Bermejo, 2007, p.7)

Donde:

λ = Longitud de onda de la radiación.

f = Distancia focal.

D = Diámetro del haz sin enfocar.

d = diámetro de haz de foco.

D_f = Profundidad de foco.

Todas estas medidas son en milímetros. (Bermejo, 2007, p.7)

h) Temperatura de trabajo.

Para un flujo de calor con entrada de energía constante se puede demostrar que la temperatura de la superficie del material en cualquier instante, t , después del inicio de la irradiación está dada por: (Steen, 1991, p.74)

$$T(0, t) = \left(\frac{2F_0}{K} \right) \left[\frac{\alpha \times t_v}{\pi} \right]^{1/2} \quad [K] \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

α = difusividad térmica (K/ρCρ) [m²/s]

K = conductividad térmica [W/mK]

t_v = tiempo necesario para determinar temperatura del material [s]

Por lo tanto:

$$t_v = \frac{\pi}{\alpha \times \left[\frac{(T_B \times K)}{2F_0} \right]^2} \quad [s] \quad \text{Ec. 8}$$

5.7. Tipos de máquinas láser CO₂

El mercado ofrece tres tipos de máquinas láser, cada una con funciones específicas según el tipo de trabajo especial que adelanten, y estos son:

- **Serie para principiantes:** Este tipo de equipos tienen un área de trabajo que va desde 16" x 12" (406 x 305 mm) hasta 24" x 12" (610 x 305 mm), y sobre la que el industrial puede trabajar materiales de hasta 305 mm de grosor. Su potencia láser varía entre los 25 y los 60 W, es decir, alcanza una velocidad de trabajo media, por lo que es recomendable para trabajos en pequeñas empresas en las que no se necesitan productos a gran escala y/o con un alto grado de complejidad.

La velocidad y potencia puede ser igualmente regulada de forma manual o por computadora en rangos que pueden aumentar de 1 hasta un 100 %; además, ofrece una buena resolución de grabado que va desde los 100 a 1000 dpi (puntos por pulgada).

- **Serie profesional:** Este tipo de máquina funciona a mayores velocidades, con grabados y Cortes de mayor calidad y precisión, por lo que es utilizada ampliamente en medianas y grandes empresas.

En el mercado se encuentran máquinas que ofrecen áreas de grabado desde 18" x 12" (457 x 305 mm), hasta 36" x 24" (914 x 609 mm), para trabajar superficies o materiales de espesores de hasta 305 mm.

Su potencia láser alcanza los 120 W, lo que aumenta, comparada con la anterior, casi en un 50 % la productividad de la impresión y su capacidad de resolución es de 75 a 1200 dpi.

- **Serie Industrial:** Este tipo de máquinas funcionan con láser de CO₂, láser de fibra, que permite un proceso de marcado con un alto nivel de calidad industrial. La serie industrial permite además realizar trabajos a partir de cualquier software basado en Windows, lo que incluye AutoCAD, Illustrator, CorelDRAW o prácticamente cualquier software empresarial.

La máquina láser de fibra tiene un área grande de grabado, 24" x 12" x 5" (610 x 305 x 127 mm), y la entrega de rayo láser permite un marcado de alta velocidad para grabar y cortar piezas hasta de 190.5 mm de espesor. (Castro, 2010, p.85)

6. Robot de coordenadas cartesianas.

Un robot de coordenadas cartesianas (también llamado robot cartesiano) es un robot industrial cuyos tres ejes principales de control son lineales (se mueven en línea recta en lugar de rotar) y forman ángulos rectos unos respecto de los otros. Además de otras características, esta configuración mecánica simplifica las ecuaciones en el control de los brazos robóticos. Los robots de coordenadas cartesianas con el eje

horizontal limitado y apoyado en sus extremos se denominan robots p $\acute{o$ rtico y normalmente son bastante grandes. (Wikipedia, 2014)

6.1. Robot cartesiano X-Y

El robot cartesiano XY es un sistema de posicionamiento sobre un plano X-Y, basado en dos ejes de portal accionados por motores a pasos. El control de la potencia de los servos se realiza a trav \acute{e} s de dos controladores o drivers. La programaci \acute{o} n de las tareas de posicionamiento se realiza a trav \acute{e} s de una tarjeta DSP que realiza el control de todo el sistema, con la posibilidad de definir las trayectorias.

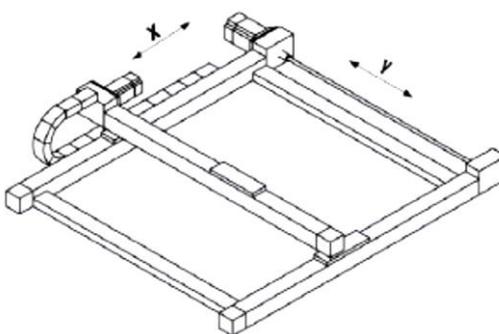


Figura 21. Esquema de un robot cartesiano X-Y.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.11)

El esquema del sistema es el siguiente:

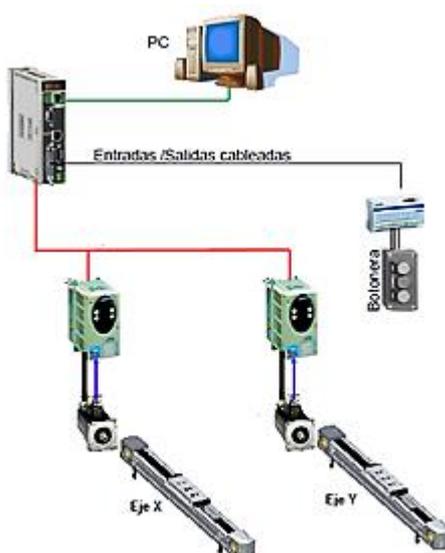


Figura 22. Esquema de los elementos principales del robot cartesiano X-Y.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.21)

6.2. Áreas de trabajo.

Dentro del equipo se encuentran tres áreas de trabajo:

- *Área de producción:* es el área donde se realizan los movimientos de posicionado.
- *Área eléctrica:* es el área donde se encuentran todos los elementos de control y potencia.
- *Área de mando o supervisión:* es aquella donde el operario de la máquina podrá dar los permisos de marcha, paro del sistema y activar la inhabilitación de la potencia en el caso que se produzca una emergencia. (Schneider Electric, 2008)

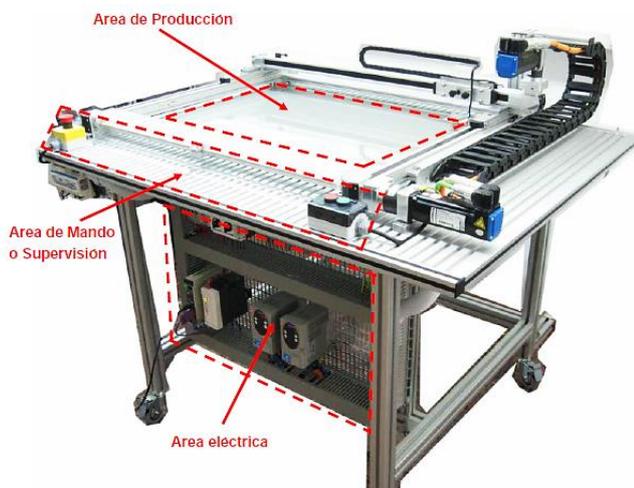


Figura 23. Áreas de trabajo del robot cartesiano X-Y.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.22)

6.3. CAD/CAM para equipos láser.

El diseño asistido por ordenador (CAD), unido a la fabricación asistida por ordenador (CAM), constituyen una vía para incrementar la productividad y eficacia en las modernas industrias.

En la industria del láser se han estudiado diferentes programas para los equipos de trabajo. Tanto en el tema CAD como en el CAM, independientemente, se han desarrollado muchas aplicaciones láser dentro de las dos tecnologías. Un programa base para aplicaciones láser, como marcado, corte, soldadura o perforado, presenta cuatro componentes mayoritarios, todos con una referencia común. Los componentes (input, output, técnica de posicionamiento y láser) usan vectores de información.

El **primer componente** input genera una base de datos CAD a partir de la información exterior, utilizando para ello potentes programas software de vectores que nacieron para reducir el tiempo y los costes asociados a las tareas repetitivas de diseño industrial. Con el crecimiento de la potencia de procesado de los ordenadores personales (PC), junto con el desarrollo de paquetes de software de ayuda al diseño, aptos para PC, la obtención de piezas optimizadas para el procesado láser se ha convertido en una realidad asequible en tiempo y costes para cualquier industria.

El sistema de output es el **segundo componente** de la integración del CAD en el CAM para los equipos de trabajo láser, consistiendo en este caso en un pos procesador. Este pos procesador actúa como nexo de unión entre los códigos generados por el programa CAD y el lenguaje de trabajo de la porción de programa CAM.

La técnica de posicionamiento del haz láser es el **tercer componente** importante en la integración al programa CAM. La mayoría incluyen mesas de coordenadas, robots o sistemas galvanométricos de espejos deflectores X-Y. Todos ellos incluyen una estructura de comandos que puede utilizar vectores de información obtenida de un pos procesador para coordinar y sincronizar los movimientos de la herramienta láser.

El propio láser constituye el **cuarto componente**, proporcionando flexibilidad, versatilidad y una vía de trabajo segura para la manufactura y fabricación. Al mismo

tiempo, el programa vectorial dirige el ciclo de trabajo regulando con eficacia el uso de la potencia del láser. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.87)

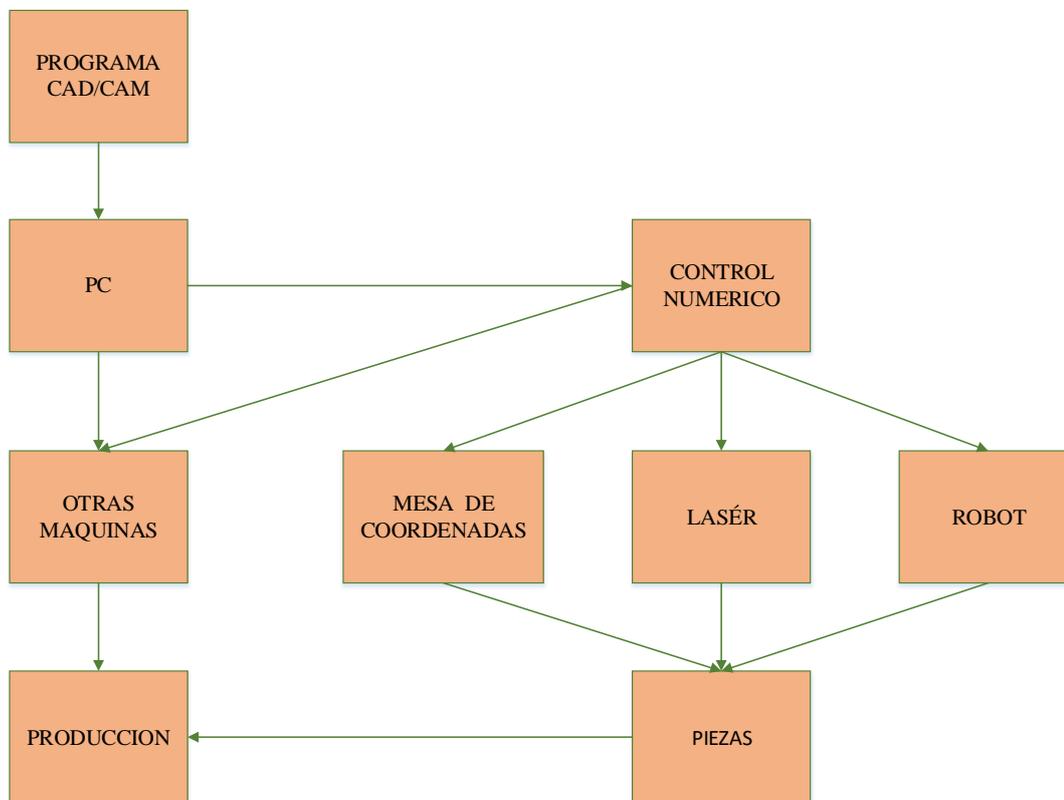


Figura 24. Diseño y manufactura asistida por ordenador.

Fuente: (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.87)

6.4. Robot cartesiano con láser.

Para este sistema se usa el robot cartesiano X-Y. Utiliza un tercer eje denominado z para ajustar la distancia focal. En algunos casos éste no se ajusta ya que es estático. Para controlar se utilizan motores a pasos conectados a un driver o controlador. Este a su vez es controlado por una computadora en la cual se especifica la trayectoria a seguir. La computadora también manda señales de control al láser, lo cual permite del prendido y apagado, la modificación de la potencia de operación es según la necesidad. Una variante de este sistema es el uso de cabezas de marcaje en donde los espejos se integran a los motores, teniendo como ventaja la alta velocidad de operación. En esta operación el láser más utilizado es el CO₂ para procesos de corte o grabado, pues también contiene un sistema de enfriamiento por agua que se lo usa para disminuir el calentamiento originado por el láser y un sistema

de extracción del material para eliminar impurezas provocadas en el proceso. (Hernández, Ortiz, Calles, & Rodríguez, 2015, p.170)

6.5. Configuración del sistema robótico cartesiano X-Y.

El robot cartesiano X-Y está compuesto por varios elementos que conforman el sistema de posicionado lineal. La descripción de cada elemento que los conforma y hace posible la ejecución de su funcionamiento se lo describe a continuación.

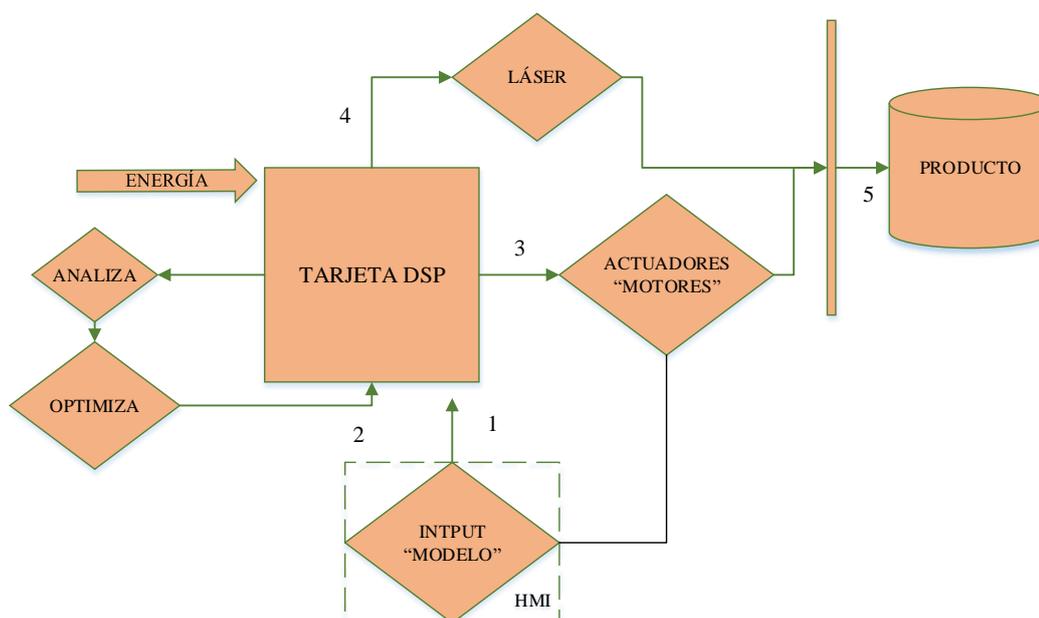


Figura 25. Diagrama de Bloques de la Máquina

Fuente: (Arpi & Cabrera , 2013)

a) Mesa coordenada.

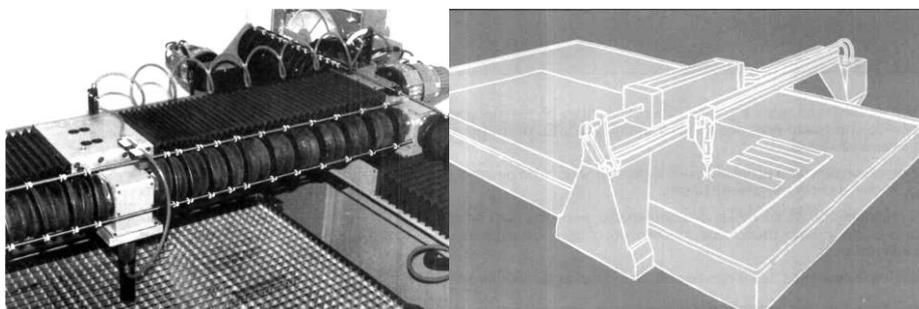


Figura 26. Pórtico de dos ejes sobre mesa estática

Fuente: (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.76)

Consisten en unos ejes de coordenadas móviles, gobernados por control numérico, en los que se sujeta la pieza a mecanizar. Las más sencillas incorporan dos ejes, X e Y, permitiendo desplazamientos en sentido positivo y negativo, es decir, de $-X$ a $+X$, de $-Y$ a $+Y$, con lo cual se puede describir cualquier movimiento en el plano. Así, desplazando la superficie bajo el haz, se pueden mecanizar piezas planas.

La utilización de mesas pórtico, en las que se desplaza el haz de láser sobre la superficie de la madera. En este tipo de mesas, los ejes móviles están situados formando un puente sobre una mesa donde se deposita el material a mecanizar. El pórtico puede soportar el cabezal de un láser, si éste es de baja potencia, o bien un sistema óptico de transmisión de haz, para láseres de alta potencia. De modo análogo, el desplazamiento de los ejes sigue las coordenadas X, Y, Z, describiendo los ejes X e Y el movimiento en el plano y reservando el eje Z para el posicionado del focalizador hasta la distancia de trabajo o retirada de éste a posición de reposo.

La combinación de movimientos proporcionados por los ejes de las mesas y de los pórticos, junto con los espejos, puede originar un número relativamente extenso de diseños de sistemas láser, no encuadrables en un modelo determinado. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.74)

- ***Módulos o guías lineales***

Los módulos lineales son sistemas mono eje para movimientos en una dimensión. Existen tres modelos, en función del tipo de movimiento lineal que realizan.

- En el *eje portal* se mueve sólo el carro. El cuerpo del eje cubre sin moverse el área de trabajo.
- En el *eje de extensión* se mueve sólo el cuerpo del eje, el cual se introduce en el área de trabajo.
- En el *eje telescópico* el carro y el cuerpo del eje se mueven fuera de la posición compacta de retracción y se introducen en el área de trabajo.

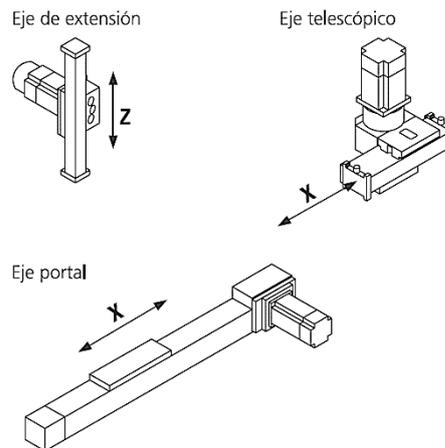


Figura 27. Tipos de módulos lineales.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.13)

Cada módulo lineal está constituido por diferentes partes, los principales son; Cuerpo, Culatas, Carro, árbol de transmisión y finales de carrera.

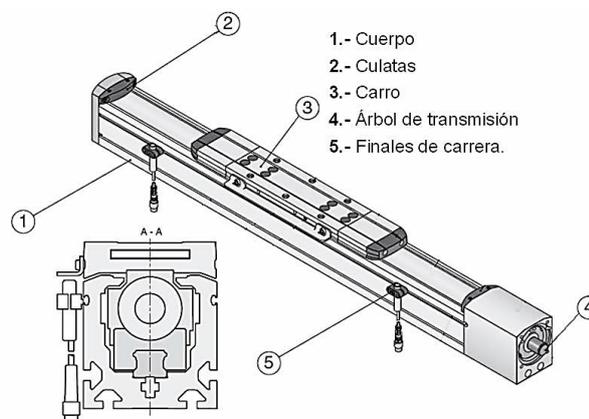


Figura 28. Partes generales de un módulo lineal y sección.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.14)

Los módulos lineales poseen una guía interior sin juego, la cual posibilita un diseño compacto que protege contra la suciedad y la influencia de las condiciones ambientales. La guía permite un movimiento silencioso, requiere poco mantenimiento y tiene una vida útil prolongada.

Por lo tanto, la elección del tipo de módulo lineal vendrá dado por las exigencias de fuerza y momento de inercia que tiene la aplicación.

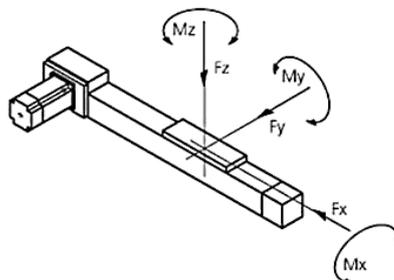


Figura 29. Fuerzas y momentos de guía lineal.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.15)

También se pueden clasificar los módulos lineales en función del elemento de transmisión de movimiento, este puede ser con correas dentadas o de husillo.

- **Correa dentada:** Ofrece una gran fuerza de avance a gran velocidad ($V \geq 20$ mm/s) y carreras útiles mayores que el tipo husillo. Las correas dentadas están hechas de poliuretano con refuerzos de alambre de acero. Si el módulo lineal se coloca en la posición horizontal, la correa dentada sólo es responsable de la aceleración, mientras que, en la posición vertical, este tiene que absorber, adicionalmente fuerzas gravitacionales.

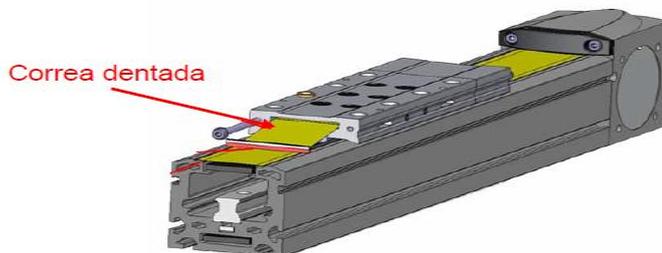


Figura 30. Sección de modulo lineal de correa dentada.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.16)

- **Husillo:** Los módulos lineales de husillo garantizan su fuerza de avance manteniéndose rígida en todo el proceso, pero en contraposición a una velocidad más baja, por lo que la precisión dependerá del paso del husillo. (Schneider Electric, 2008, p. 13)

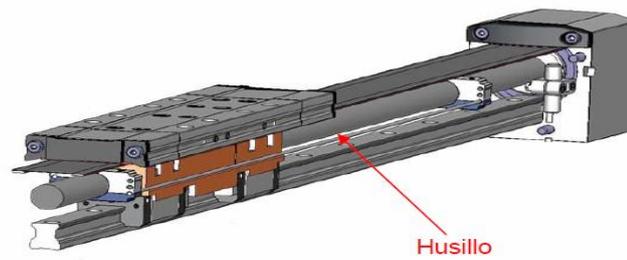


Figura 31. Sección de modulo lineal de husillo.

Fuente: (Schneider Electric, 2008, p.16)

b) Motores a paso.

La señal de control de los motores a paso son trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número discreto de grados.

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por tanto, la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente.

Para simplificación de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro inhibición) generan, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase, a estos circuitos se los conoce como controladores o drivers.

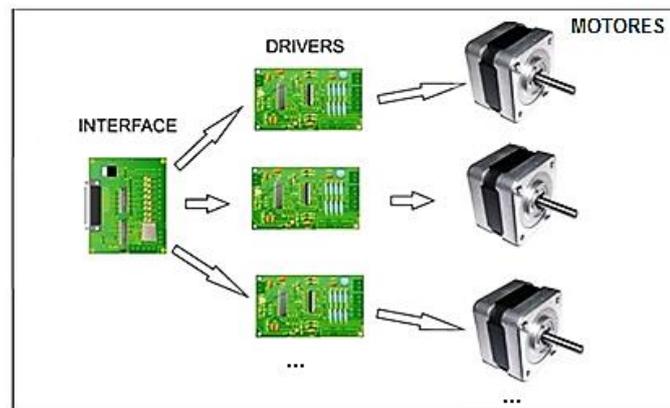


Figura 32. Esquema Funcional de los Motores

Fuente: (Arpi & Cabrera , 2013)

Su principal ventaja con respecto a los servomotores es su capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de forma continua, con velocidad variable, como motores síncronos, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. Se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, fiables y fáciles de controlar, pues el ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.

Entre los inconvenientes se puede citar que su funcionamiento a bajas velocidades no es suave, y que aumenta el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997, p.33)

Para una correcta selección de un motor a pasos es necesario calcular la potencia necesaria, que dara la capacidad de movilizar distintas cargas.

$$P = T \times \omega \quad [W] \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

P: Potencia del motor a pasos [W]

T: Par motor [Nm]

ω : Velocidad angular [rad/s]



Figura 33. Ilustración Motor a Pasos.

Fuente: (Shenzhen Penghui technology, 2015)

c) Tubo láser CO₂.

Su función principal en el sistema robótico cartesiano es el de generar el haz de luz láser que se encarga de descomponer la madera de manera que se realice un corte sin canto. Este será capaz de cortar un espesor de 8 mm de cualquier tipo de madera y su control partirá de una tarjeta DSP, la misma que se encargará de cargar los diseños que se cortaran en la madera.

d) Elementos ópticos.

Para aprovechar a fondo las posibilidades que ofrece un haz láser, su dirigibilidad y enfoque, se utilizan diversos componentes ópticos. Entre los más utilizados encontramos lentes, espejos y láminas semitransparentes. Otros elementos tales como redes de difracción, polarizadores y dispositivos no lineales, no suelen utilizarse en el tratamiento del haz a nivel industrial, aunque los resonadores puedan llevarlos incorporados. (Esténoz Valenzuela, 2011)



Figura 34. Cabeza de corte láser CO₂.

Fuente: (Shuzou master laser technology, 2015)

- ***Lentes y sistemas de lentes.***

Las lentes son elementos capaces de concentrar o dispersar un haz aprovechando la refracción que sufre la luz al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción. Según su comportamiento las lentes se clasifican en convergentes o divergentes. En la primera un haz que llega paralelo a la lente es focalizado al otro lado de la misma, la distancia comprendida entre la lente y el punto donde se cruzan posteriormente se denomina distancia focal de la lente. En el segundo caso se trata de una lente divergente. La distancia focal es la distancia comprendida entre la lente y las prolongaciones de los rayos que emergen de la misma.

Este parámetro define el comportamiento de la lente y tradicionalmente se expresa en pulgadas. Para las lentes convergentes la focal tiene signo positivo y para las divergentes el signo es negativo. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.66)

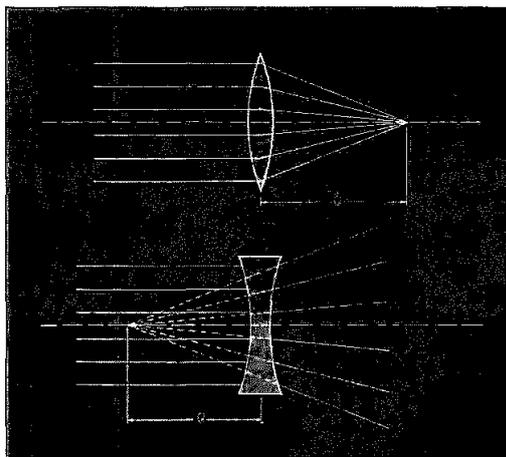


Figura 35. Lente convergente (superior) y divergente (inferior).

Fuente: (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p.77)

- *Espejos*

Únicamente se considerará los espejos utilizados fuera del resonador.

Los dos tipos de espejos más utilizados son los planos y los convergentes o cóncavos.

Los espejos planos se utilizan para reflejar el haz y llevarlo hasta la lente de focalización.

Los espejos convergentes sirven a la vez para reflejar y focalizar.

En la elección de los espejos, al igual que en las lentes, hay que tener en cuenta el tipo de láser utilizado, puesto que tanto el sustrato utilizado como el tratamiento superficial de multicapas están diseñados para una estrecha banda de longitudes de onda. (Bachs, Cuesta, & Carles, 1988, p. 69)

e) *Sistema de enfriamiento de láser.*

- *Enfriador de agua (Water chiller).*

Los enfriadores de líquido son sistemas de refrigeración mecánica; su funcionamiento se basa en la extracción de calor, por medio de un refrigerante, el cual se absorbe del líquido a enfriar y lo transporta hacia un medio donde se disipa.

Los condensadores de los "Chillers" suelen ser principalmente enfriados por aire, aunque también pueden ser enfriados por agua. (Gómez, Daza, & Quintero, 2012)



Figura 36. Enfriador de agua.

Fuente: (Rabbit laser, 2015)

Para lograr este objetivo un enfriador de agua está constituido por compresores de refrigeración, intercambiador de calor del tipo casco y tubo, condensador, circuito de control, líneas y accesorios de refrigeración, gabinete, refrigerante R-22 o ecológico y el compresor.

El "compresor" es el corazón del sistema, ya que es el encargado de hacer circular al refrigerante a través de los diferentes componentes del sistema de refrigeración del "Chiller". Succiona el gas refrigerante sobrecalentado a baja presión y temperatura, lo comprime aumentando la presión y la temperatura a un punto tal que se puede condensar por medios condensantes normales (Aire o agua). A través de las líneas de descarga de gas caliente, fluye el gas refrigerante a alta presión y temperatura hacia la entrada del condensador.

El "evaporador" es un intercambiador de calor del tipo casco y tubo, su función es proporcionar una superficie para transferir calor del líquido a enfriar al refrigerante en condiciones de saturación. Mediante la línea de succión fluye el gas refrigerante como

vapor a baja presión proveniente del evaporador, la succión del compresor es el componente del sistema de refrigeración donde se efectúa el cambio de fase del refrigerante. Es aquí donde el calor del agua es transferido al refrigerante, el cual se evapora al tiempo de ir absorbiendo el calor.

El "condensador" es el componente del sistema que extrae el calor del refrigerante y lo transfiere al aire o al agua. Esta pérdida de calor provoca que el refrigerante se condense. Su función es proporcionar una superficie de transferencia de calor, a través de la cual pasa del gas refrigerante caliente al medio condensante. Mediante la línea de líquido fluye el refrigerante en estado líquido a alta presión a la válvula termostática de expansión.

La "válvula termostática de expansión" tiene como finalidad controlar el suministro apropiado del líquido refrigerante y el vapor, así como reducir la presión del refrigerante de manera que vaporice en el evaporador a la temperatura deseada.

Para que un enfriador de líquido trabaje en forma automática, es necesario instalarle ciertos "dispositivos eléctricos", como son los controles de ciclo. Los "controles" que se usan en un enfriador son de acción para temperatura (termostatos), de acción por presión (presostatos) y de protección de falla eléctrica (relevadores).

El refrigerante líquido entra en el "dispositivo de expansión" donde reduce su presión. Al reducirse su presión se reduce bruscamente su temperatura.

El refrigerante a baja temperatura y presión pasa por el "evaporador", que al igual que el condensador es un intercambiador de calor y lo absorbe. (EcoChillers Inc., 2015)

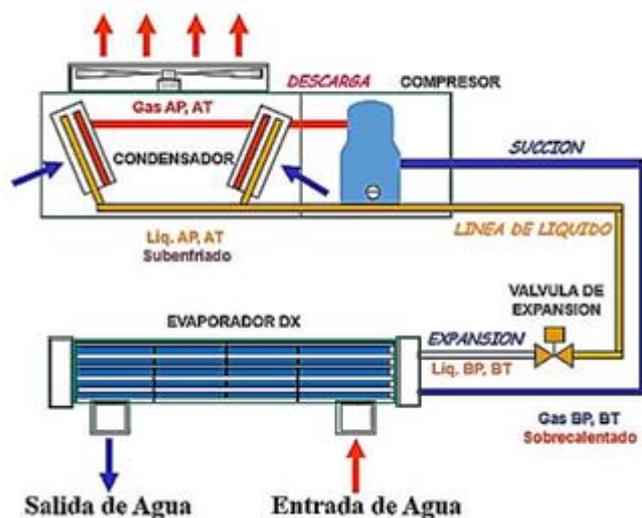


Figura 37. Composición de un enfriador de agua.

Fuente: (EcoChillers Inc., 2015)

f) Sistema de extracción de gases.

El sistema de extracción de gases es un dispositivo de ventilación compuesto por mangueras y un ventilador que se encargan de extraer todo tipo de gases producidos por la acción del láser en la madera, cuyo principal objetivo es el de proteger al usuario y al medio ambiente



Figura 38. Sistema de extracción de gases.

Fuente: (NAER, 2016)

g) Procesador digital de señales (DSP).

Un procesador digital de señales o DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras, normalmente provenientes de un conversor analógico/digital (ADC). (Ignacio, 2015)

CAPITULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

1. Sistema mecánico

Para el sistema mecánico del robot cartesiano X-Y se considera las siguientes partes:

- Mesa tipo pórtico X-Y.
- Guías lineales.
- Sistema de transmisión.
- Sistema láser
- Sistema óptico

1.1. Diseño de la estructura de soporte.

De conformidad con el requerimiento de la empresa, la mesa debe ser totalmente ergonómica, de manera que facilite el ingreso de las planchas de madera. Esta mesa debe ser de 2.5 m X 1.3 m.

Para la selección de los componentes de transmisión y movilización del sistema se aplican los cálculos respectivos para determinar capacidades y necesidades que presente el sistema robótico cartesiano.

1.1.1. Diseño de la mesa tipo pórtico X-Y.

Empezando por diseñar la estructura de la máquina y considerando el tamaño y la necesidad de desplazamiento en los dos ejes X e Y se tiene:

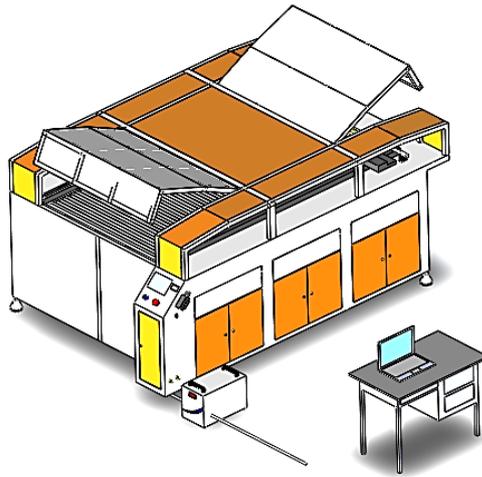


Figura 39. Vista superior de mesa tipo pórtico X-Y.

Recorrido longitudinal en X= 1300 mm

Recorrido transversal en Y = 2500 mm

A través del análisis realizado se consideró adecuado el uso de una "mesa de tipo pórtico", en la misma que se desplaza su herramienta de trabajo (boquilla de láser) en los ejes X e Y a través de guías lineales y sistemas de transmisión adecuados para movilizarla.

Debido a la selección de este diseño para la estructura del robot cartesiano se podrá apreciar ciertas similitudes con otros robots cartesianos, ya que la estructura expuesta es la misma para los robots de esta categoría.

La mesa es robusta y liviana. Es fácil de realizar los procesos de soldadura y mecanizado. Los materiales están disponibles en el mercado y a costos razonables. En este caso planchas de acero de 3 mm de espesor son las más adecuadas para su composición externa y su chasis compuesto por patas distribuidas adecuadamente para soportar planchas de madera cuyo peso no se considera, ya que no provoca ningún tipo de deflexión en dicha estructura.

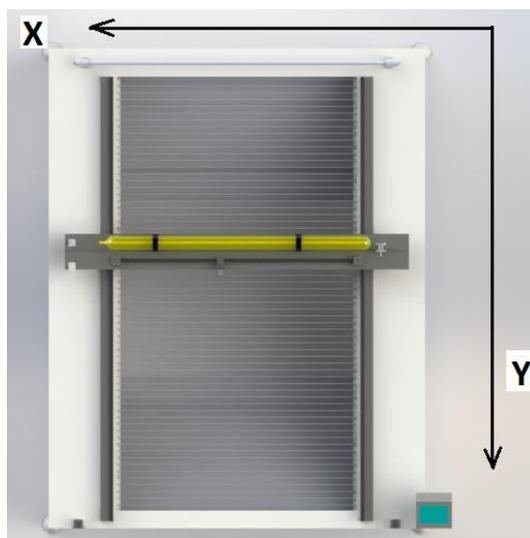


Figura 40. Vista superior de mesa tipo pórtico X-Y.

La estructura horizontal de la máquina es cerrada y únicamente cumple la función de soporte para la estructura vertical y soporte para las guías de la mesa.

1.1.2. Selección de guías lineales.

Para la selección de guías lineales adecuadas para transportar el tubo láser, espejos de reflexión y cabeza láser cuya masa es de 11.7 kg se toma en cuenta la ficha de información técnica de guías lineales de la marca HIWIN.

En dicha ficha los parámetros importantes para su selección adecuada son:

- Tipo de aplicación
- Espacio disponible
- Precisión
- Rigidez
- Recorrido
- Magnitud y dirección de las cargas
- Velocidad y aceleración

- Ciclos de trabajo
- Vida de servicio
- Entorno – ambiente

Esta marca de guías lineales dispone de varias series según su aplicación, entre las que se tiene:

- **Serie HG:** Fresadoras, tornos, centros de mecanizado, rectificadoras
- **Serie EG:** Automatismos, dispositivos automáticos de dotación, maquinaria para trabajar madera, equipos de medición, dispositivos de fabricación de semiconductores

También se dispone de diferentes tipos de precisión para la selección:

C, H, P, SP, UP.

Para determinar el tamaño y número de patines se considerará lo siguiente:

- Condición de la carga dinámica
- Si la aplicación lleva husillos de recirculación de bolas, el tamaño de la guía debe ser similar al diámetro del husillo. Por ejemplo, si el diámetro del husillo es 25, el tamaño de la guía lineal debe ser 25.
- Para el cálculo de la carga máxima por patín se considera lo siguiente:
 - a) Tomar como referencia los ejemplos de cálculo de cargas, y calcular la carga máxima.
 - b) Asegurarse bien de que la capacidad de carga estática de la guía lineal seleccionada es superior al valor de la carga aplicada.

La selección de la precarga depende de la rigidez requerida y la precisión de la superficie de montaje.

Para la identificación de rigidez se calcula la deformación (δ) utilizando la tabla con valores de rigidez, seleccionando precargas más elevadas y tamaños de guías lineales más grandes para aumentar la rigidez.

a) Selección de guía lineal para transporte de cabezal de láser CO₂ en dirección al eje X.

Como parámetro principal para la selección de la guía lineal en la aplicación de transporte del cabezal del láser CO₂ se toma en cuenta las necesidades de precisión, ya que a través de este se realiza los movimientos coordinados en el eje X de los diseños seleccionados.

Para esto según la aplicación se selecciona el patín de serie EG ya que sirve para transporte de dispositivos automáticos de dotación.

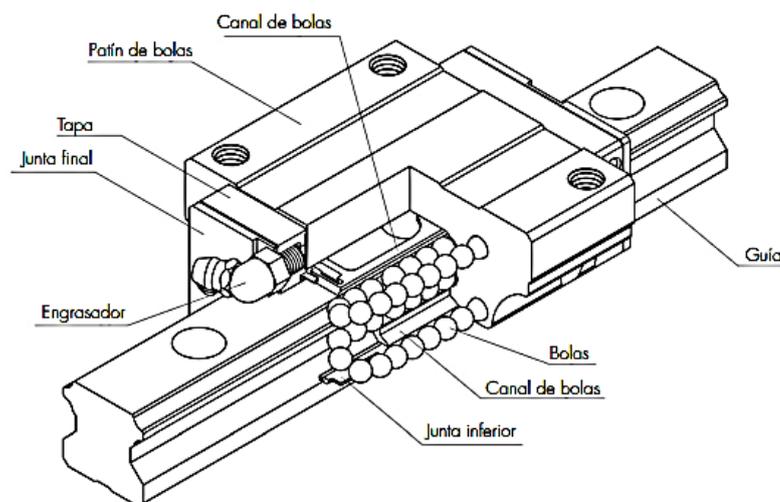


Figura 41. Composición de guía lineal de 4 hilos de bolas.

Fuente: (SAIN, 2015).

Para el montaje del cabezal sobre la guía éste necesariamente debe ser cuadrado (H), el patín está constituido por 4 hilos de bolas generando así un sistema de contacto de 45 ° con el riel, permitiendo así grandes precargas para sistemas de alta precisión manteniendo una rigidez excepcional, gracias al contacto de 45 ° de dos puntos los patines son capaces de absorber los errores de montaje y además compensarlos para mejorar la precisión del movimiento.

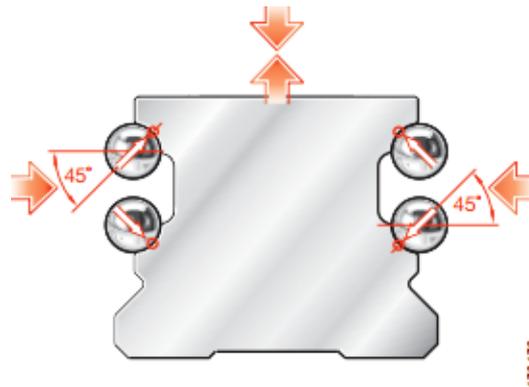


Figura 42. Ángulos de contacto de las 4 hileras de bolas.

Fuente: (INA, 2007).

Como necesidad fundamental se toma en cuenta la capacidad de carga estática (C_0) del patín, el mismo que tiene que ser mayor a la carga aplicada (P), en este caso $C_0 = 9.4 \text{ kN}$ como se muestra en la tabla 5 y $P = 4.9 \text{ N}$ (peso del cabezal de CO_2).

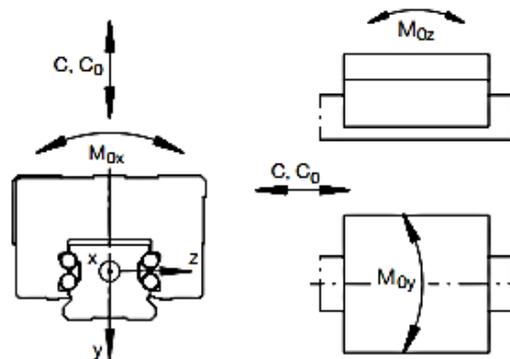


Figura 43. Direcciones de la carga.

Fuente: (INA, 2007)

Tabla 5**Capacidades de carga de serie EGH de HIWIN.**

Modelo N°	Capacidad de carga dinámica	Capacidad de carga estática	Máximo momento estático		
	C (kN)	C ₀ (kN)	M _R (kN-m)	M _P (kN-m)	M _Y (kN-m)
EGH15SA	5,35	9,4	0,08	0,04	0,04
EGH15CA	7,83	16,19	0,13	0,1	0,15
EGH20SA	7,23	12,74	0,13	0,06	0,06
EGH20CA	10,31	21,13	0,22	0,16	0,16
EGH25SA	11,4	19,5	0,23	0,12	0,12
EGH25CA	16,27	32,4	0,38	0,32	0,32
EGH30SA	16,42	28,1	0,4	0,21	0,21
EGH30CA	23,7	47,46	0,68	0,55	0,55
EGH35SA	22,66	37,38	0,56	0,31	0,31
EGH35CA	33,35	64,84	0,98	0,69	0,69

Fuente: (GAES, 2015, p.52)

A través del análisis realizado previamente para la correcta selección de la guía lineal que movilizara la cabeza láser se ha seleccionado el modelo EGH15SA ya que, debido a su composición dimensional, estructural y su capacidad de carga este es el más indicado, también se toma muy en cuenta su composición de 4 hilos de bolas, las mismas que aumentan la precisión gracias a su contacto de 45° con el riel.

Se selecciona la serie SA debido a que las dimensiones del patín son menores a las del CA, representando así menor uso de espacio y menor carga para los patines que se movilizan en el eje Y, también minorara el esfuerzo de los motores a pasos.

b) Selección de guías lineales para transporte de sección móvil en dirección al eje Y.

Debido a la estructura que transporta la cabeza láser, sistema de reflexión y el tubo láser es necesario el uso de dos guías lineales para poder mantener estable la estructura.

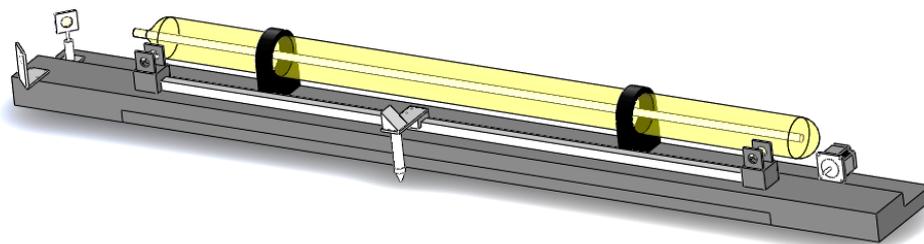


Figura 44. Estructura transportadora de la cabeza láser.

Tomando en cuenta el análisis realizado es necesario determinar la carga aplicada a cada uno de los patines por lo que se realizara un análisis de fuerzas y momento de fuerzas, tomando en cuenta la masa de cada uno de los componentes de la estructura que son: $m_r = 0.05$ [kg]; $m_R = 0.1$ [kg]; $m_L = 4$ [kg]; $m_M = 1$ [kg]; $m_S = 0.03$ [kg]; $m_E = 11.7$ [kg] $m_p = 0.09$ [kg].

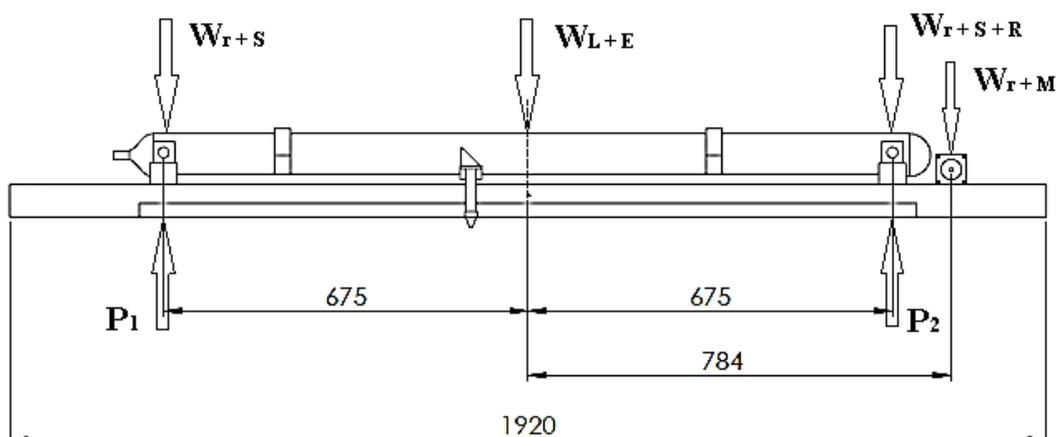


Figura 45. D.C.L de la estructura transportadora de la cabeza láser.

A través de la figura 45 se puede realizar el sistema de fuerzas de la estructura donde:

P_1 : Carga aplicada al patín 1.

P_2 : Carga aplicada al patín 2.

Para el cálculo de la carga aplicada al patín 2 se realiza la sumatoria de momentos en el patín 1.

$$\sum M_{P_1} = 0$$

$$0.675 \times W_{L+E} + 1.35 \times W_{r+S+R} + 1.459 \times W_{r+M} - 1.35 \times P_2 = 0$$

$$P_2 = 89.83 \quad [N]$$

Para el cálculo de la carga aplicada al patín 1 se realiza la sumatoria de fuerzas en el eje Y.

$$\sum F_Y = 0$$

$$P_1 - W_{r+S} - W_{L+E} - W_{r+S+R} - W_{r+M} + P_2 = 0$$

$$P_1 = 77.39 \quad [N]$$

Determinadas las cargas que se aplican a cada patín se toma como parámetro principal las necesidades de precisión ya que a través de este realiza los movimientos coordinados en el eje Y de los diseños seleccionados.

Para esto según la aplicación se selecciona el patín de serie HG ya que sirve para sistemas robóticos con mesa de tipo pórtico (fresadora, torno CNC, centro de mecanizado etc.).

De la misma manera que el patín de la cabeza láser estos deberán ser de forma cuadrada (H) ya que la estructura transportadora del láser y la cabeza láser tienen superficie plana, por motivos de precisión de manera que el peso de la estructura se distribuya uniformemente, se seleccionará las guías lineales constituidas por 4 hilos de bolas.

Como necesidad fundamental se toma en cuenta la capacidad de carga estática (C_o) del patín el mismo que tiene que ser mayor a la carga aplicada (P), en este caso $C_o = 35.9 \text{ kN}$ como se muestra en la tabla 6, tanto $P_1 = 77.39 \text{ [N]}$ y $P_2 = 89.83 \text{ [N]}$.

Tabla 6**Capacidades de carga de serie HGH de HIWIN.**

Modelo N°	Capacidad de carga dinámica	Capacidad de carga estática	Máximo momento estático		
	C (kN)	CO (kN)	MR (kN-m)	MP (kN-m)	MY (kN-m)
HGH15CA	11,38	16,97	0,12	0,1	0,1
HGH20HA	17,75	27,76	0,27	0,2	0,2
HGH20CA	21,18	35,9	0,35	0,35	0,35
HGH25CA	26,48	36,49	0,42	0,33	0,33
HGH25HA	32,75	49,44	0,56	0,57	0,57
HGH30CA	38,74	52,19	0,66	0,53	0,53
HGH30HA	47,27	69,16	1,16	0,81	0,81
HGH35CA	49,52	69,16	1,16	0,81	0,81
HGH35HA	60,21	91,63	1,54	1,4	1,4
HGH45CA	77,57	102,71	1,98	1,55	1,55
HGH45HA	94,54	136,46	2,63	2,68	2,68
HGH55CA	114,44	148,33	3,69	2,64	2,64
HGH55HA	139,35	196,2	4,88	4,57	4,57
HGH65CA	163,63	215,33	6,65	4,27	4,27
HGH65HA	208,36	303,13	9,38	7,38	7,38

Fuente: (GAES, 2015, p.35)

A través del análisis realizado previamente para la selección de las guías lineales que movilizan la estructura de la cabeza láser y el tubo láser, se ha seleccionado el modelo HGH20CA ya que, debido a su composición dimensional, estructural y su capacidad de carga este es el más indicado.

Se selecciona la serie CA debido a que las dimensiones del patín son mayores a las del HA, esto porque la superficie de montaje de la estructura con el patín es amplia por lo que entre más grade sea el patín mejor ya que de esta manera se distribuirá de mejor manera la carga aplicada al patín.

1.1.3. Selección de bandas de transmisión de motores a pasos a ejes X e Y.

Debido a que se necesita de precisión en la transmisión de movimiento de los motores a los ejes se selecciona “correas dentadas o síncronas”.

Las correas dentadas garantizan exactitud en la relación de transmisión considerando que se puede trabajar a altas velocidades de giro siendo así la mejor opción.

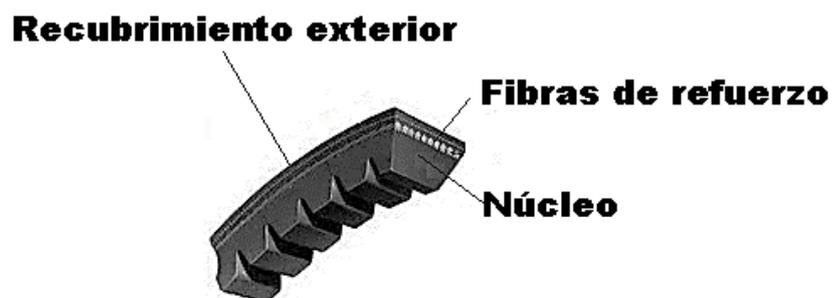


Figura 46. Elementos de una correa dentada.

Fuente: (Rodríguez, 2015)

En el caso de las correas síncronas, el núcleo de los dientes ofrece una gran rigidez y es la parte de la correa que absorbe la mayor parte de los esfuerzos, para esta correa se distinguen dos tipos de perfiles normalizados: trapecoidal y curvilíneo.

La gran ventaja conseguida con los perfiles curvilíneos (HTD) es que la zona de alta concentración de tensiones se sitúa en el centro del diente, frente a las correas dentadas de perfil trapecoidal (T), donde los mayores niveles de tensión se concentran en la esquina de la base del diente del lado que arrastra la polea, reduciendo su duración. (Rodríguez, 2015)

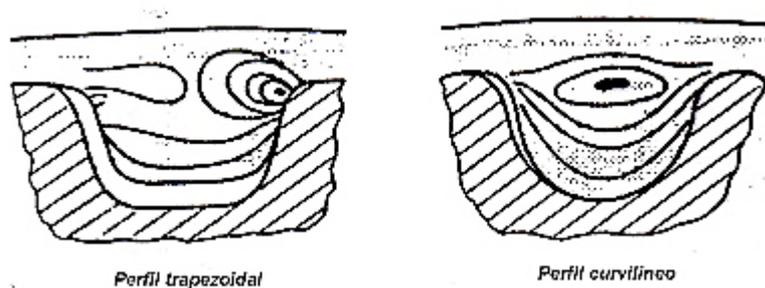


Figura 47. Distribución de tensiones en correa dentada.

Fuente: (Rodríguez, 2015)

A través del análisis realizado y la figura 47 se puede apreciar que es más conveniente seleccionar la correa síncrona de perfil HTD debido a que se adapta mejor a la dentadura de la polea y redistribuye mejor las tensiones.

Para la selección de correa síncrona de perfil HTD se toma como referencia el ábaco para selección de correas dentadas de perfil curvilíneo HTD.

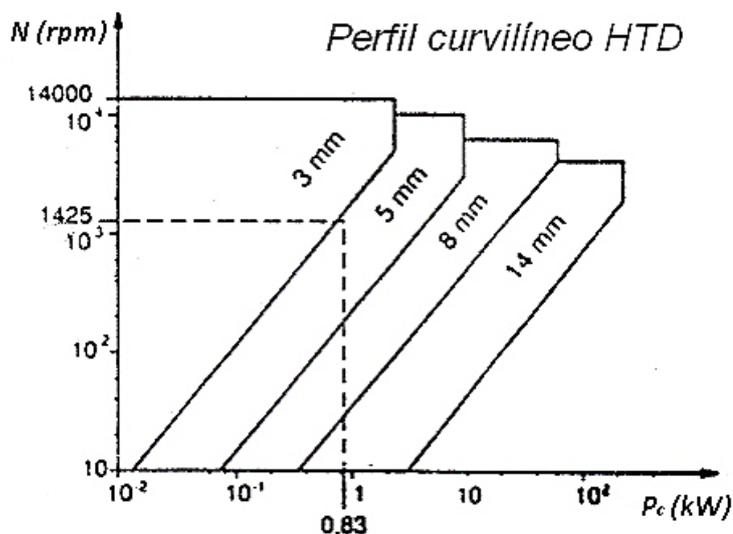


Figura 48. Ábaco para selección de correas dentadas de perfil curvilíneo.

Fuente: (Rodríguez, 2015)

Como se puede apreciar en la figura 48 para determinar el paso (p) necesario en la correa de perfil curvilíneo HTD se necesita determinar la potencia corregida (P_c) y la velocidad de giro de transmisión (N).

$$P_c = P \times (C_1 + C_2 + C_3) \quad [kW]$$

Ec. 10

Donde:

P = Potencia transmitida [kW]

C_1 = Coeficiente de corrección debido a sobrecargas en la transmisión

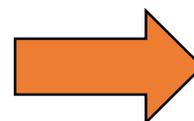
C_2 = Coeficiente de corrección debido a la multiplicación y se obtiene según el número de dientes de contacto de la correa con las poleas.

C_3 = Coeficiente de corrección debido al tiempo continuado de funcionamiento.

Tabla 7

Valores de C_1 según el tipo de instalación.

Aplicación	C_1
Agitador mezclador:	
Para líquidos	1,4 - 1,8
Para semilíquidos	1,5 - 1,9
Aspiradores y ventiladores:	
Centrifugadoras	1,7 - 1,9
Compresores:	
Centrífugos o rotativos	1,6 - 1,8
A pistones	2,0 - 2,4
Elevadores	1,6 - 2,0
Trituradoras:	
Cilindros y martillos	2,2 - 2,5
Grupos generadores y excitadores	1,6 - 2,0
Líneas de ejes (árboles de transmisión)	1,5 - 1,9
Máquinas industriales:	
Agitadores, calandrias, secadores, bobinadores, batidores, bombas, trituradoras, refinadores	1,4 - 1,8
Trituradoras, refinadoras	1,7 - 2,1
Máquinas industria cerámica:	
Cortadoras, dosificadoras	1,5 - 1,9
Trefilas	1,8 - 2,2
Máquina elaboración madera:	
Tornos, sierras de cinta, cortadoras, sierras circulares	1,3 - 1,4
Cepilladoras	1,4 - 1,6
Máquinas herramientas:	
Taladradoras, tornos, roscadoras, entalladoras, fresadoras, cepilladoras	1,4 - 1,8
Rectificadoras	1,5 - 1,9
Molinos de granos	1,7 - 2,1



Bombas:	
Centrifugas, rotativas, de engranes	1,5 - 1,9
De pistones	2,0 - 2,4
Tamices:	
Rotativos a tambor o cónicos	1,4 - 1,5
Vibratorios	1,5 - 1,7
Transportadores:	
Con banda de caucho (material ligero)	1,3 - 1,7
Con banda de caucho (material pesado)	1,6 - 1,8
elevadores, montacargas	1,7 - 1,9

Fuente: (UCML, 2015)

Tabla 8

Valores de C_2 según la relación de transmisión.

Relación de transmisión i	C_2
De 1 a 1,24	-
De 1,25 a 1,74	0,1
De 1,75 a 2,49	0,2
De 2,5 a 3,5	0,3
Más de 3,5	0,4

Fuente: (UCML, 2015)

Tabla 9

Valores de C_3 según el tipo de funcionamiento.

Tipo de funcionamiento	C_3
8 - 10 horas día	-
Continuo 10 - 16 horas	0,1
16 - 24 horas día	0,2
Intermitente	-0,1
Estacional	
con poleas tensoras	0,1

Fuente: (UCML, 2015)

El movimiento de las tres guías depende totalmente de sus motores y su transmisión por lo que se necesita de un sistema de transmisión por bandas acopladas a sus ejes que cuentan con un diámetro 5 milímetros para que se puedan acoplar a estas las ruedas de transmisión cuyo paso en sus dientes depende netamente de la banda a seleccionar, para esto es necesario determinar el número de dientes de cada una de las ruedas, tomando en cuenta que la relación de transmisión para la el recorrido de las bandas que van acopladas a las guías son 1:1, ya que es necesario que la transmisión de movimiento a las guías, en todo su recorrido se tenga una misma frecuencia de giro, para esto se considera trabajar con ruedas de 24 dientes con un módulo de 1, los mismos que se encargaran de transmitir el movimiento a lo largo de sus bandas en el eje Y moviendo las dos guías que transportaran la estructura móvil del eje X.

Por otro lado también serán los encargados de transmitir el movimiento de la guía lineal acoplada a la cabeza láser en el eje X, el sistema de transmisión acoplado al motor cuenta con una relación de transmisión de 2:1 esto se lo hace de manera que se aumente el par generado por el motor al doble de su capacidad obteniendo así un sistema de transmisión reductor. La necesidad de aumentar su par se debe a que el eje Y moviliza una masa 16.88 kg dividido en dos sistemas de transmisión conformados por guías lineales, así el motor genera menor esfuerzo aprovechando el par motor de manera mecánica.

Para esto se determina que el sistema de transmisión que conforma el motor y el eje es a través de dos ruedas de 48 dientes para la rueda conducida y de 24 dientes para la rueda conductora, tomando en cuenta que la longitud de la banda que los conforma depende de su distancia entre centros.

Para determinar la potencia corregida se necesita calcular la potencia necesaria para movilizar la estructura móvil del eje X. Para este cálculo se estima una velocidad angular necesaria para el sistema, como se muestra en el siguiente cálculo.

Según se apreció de una cortadora láser comercial de marca Reci de 100 W esta trabaja a velocidades de 1 – 1000 mm/min para el corte, por lo que se le toma como referencia para el cálculo de la velocidad angular (ω) necesario para el sistema robótico

cartesiano, tomando en cuenta que el radio de la rueda conducida del sistema de transmisión tiene un diámetro primitivo de 48 mm.

$$\omega = \frac{V}{r} = \frac{1000}{24} = 41.67 \left[\frac{rad}{s} \right] = 397.92 [rpm]$$

Para determinar el par que se produce en las ruedas de 24 mm de diámetro del sistema de transmisión es necesario calcular las fuerzas que se producen a lo largo de su correa dentada, tomando en cuenta que el coeficiente de fricción (μ) de una guía lineal esta alrededor de 0.004 según menciona en la ficha técnica de guías lineales HIWIN. (GAES, 2015, p.9)

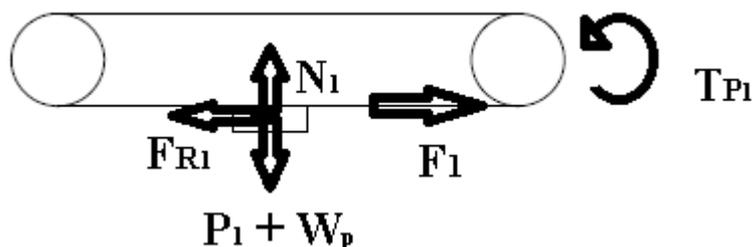


Figura 49. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 1.

De esta manera para el cálculo de la fuerza necesaria para arrastrar el patín 1 (F_1) se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$N_1 = 78.27 [N]$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_1 = \mu \times N_1 = 0.004 \times 78.27 = 0.31 [N]$$

De manera que el par de la carga lineal 1, ejercido por el patín 1, tomando en cuenta un rendimiento de la rueda y la correa (η) de 0.2, tenemos que:

$$T_{P_1} = \frac{F_1 \times D_1}{2 \times \eta}$$

Ec. 11

Donde:

D_1 : Diámetro de la rueda 1

F_1 : Carga lineal del patín 1.

η : Rendimiento del sistema de transmisión rueda correa.

$$T_{P_1} = \frac{0.31 \times 0.024}{2 \times 0.2} = 18.6 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

De la misma manera para el cálculo del par ejercido por el patín 2 en la rueda es:

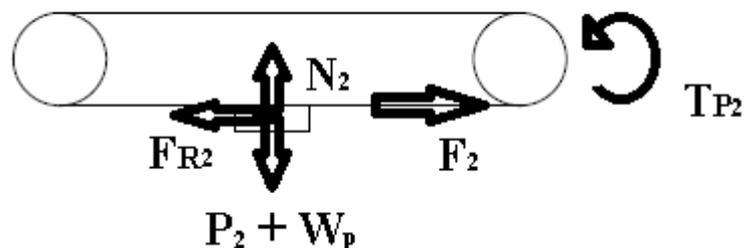


Figura 50. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 2.

$$\sum F_y = 0$$

$$N_2 = 90.71 \text{ [N]}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_2 = \mu \times N_2 = 0.004 \times 90.71 = 0.36 \text{ [N]}$$

De manera que el par de la carga lineal 2, ejercido por el patín 2, tomando en cuenta un rendimiento de la rueda y la correa (η) de 0.2, tenemos que:

$$T_{P_2} = \frac{F_2 \times D_2}{2 \times \eta}$$

Ec. 12

Donde:

D_2 : Diámetro de la rueda 2.

F_2 : Carga lineal del patín 2.

η : Rendimiento del sistema de transmisión rueda correa.

$$T_{P_2} = \frac{0.36 \times 0.024}{2 \times 0.2} = 21.6 \quad [N \cdot mm]$$

De esta manera con el par que se produce en cada una de las guías se tiene que la potencia necesaria para poder movilizar dicha estructura móvil tomando en cuenta la ecuación 10 donde:

$$P = (T_{P_1} + T_{P_2}) \times \omega \quad [W]$$

Reemplazando se tiene que:

$$P = (18.6 \times 10^{-3} + 21.6 \times 10^{-3}) \times 41.67 = 1.68 \quad [W] = 1.68 \quad [W]$$

De esta manera se puede apreciar que el motor a seleccionar para movilizar la estructura, como mínimo debe tener una potencia de 1.68 [W], como se mencionó anteriormente. Para disminuir el par ejercido por la rueda acoplada al motor, el sistema presenta una relación de transmisión de 2:1.

Con la potencia necesaria para aplicar a la estructura móvil y los coeficientes a considerar de las tablas 7, 8 y 9 se calcula la potencia corregida.

Según la tabla 7, la aplicación que concuerda con el sistema se encuentra en maquinaria de elaboración de madera: Tornos, sierras de cinta, cortadoras, sierras circulares.

El sistema robótico cartesiano XY tiene las características de un torno CNC y entra directamente a la aplicación de maquinado de madera, por lo que:

$$C_1 = 1.4$$

Para determinar C_2 se ha desarrollado un análisis geométrico en el que se puede apreciar directamente los puntos tangentes de las ruedas a la correa para así realizar

una estimación del número de dientes tomando en cuenta que la distancia entre centros de las poleas es de 68 milímetros.

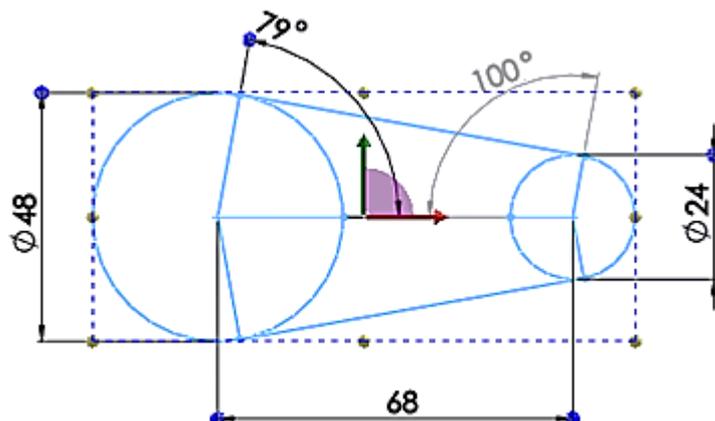


Figura 51. Geometría del sistema de transmisión del motor al eje.

Como se puede apreciar en la figura 51, en la rueda conducida la correa produce un ángulo de 10° adicionales a su mitad, mientras que la rueda conductora se reduce un ángulo de 10° aproximadamente, por lo que se considera que para la rueda conducida hace un contacto de 26 dientes totales con la banda mientras que la rueda conductora hace un contacto de 10 dientes totales con la banda.

$$i_c = \frac{26}{10} = 2.6$$

De la relación de transmisión i_c comparándola con la tabla 8 se tiene que:

$$C_2 = 0.3$$

Para la selección de C_3 se estima el tiempo de funcionamiento de la máquina el cual será de 8 horas diarias como máximo, según la empresa EDIMCA.

Donde según la tabla 9 se tiene que:

$$C_3 = 0$$

De manera que la potencia corregida a través de la ecuación 11 es:

$$P_c = 1.68 \times 10^{-3} \times (1.4 + 0.3 + 0)$$

$$P_c = 2.9 \text{ [kW]}$$

A través de los datos calculados, potencia corregida P_c y velocidad angular estimada ω , se tiene en la figura 48 que el paso es de 3mm.

Para determinar la longitud de la correa necesaria se tiene que:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2} \times (D + d) + \frac{(D - d)^2}{4E} \quad [\text{mm}] \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

E = distancia entre ejes de poleas

D = diámetro de la polea mayor

d = diámetro de la polea menor

Todos estos datos se los mide en milímetros.

Por lo que de la ecuación 13 se determina la longitud aproximada de la correa de transmisión.

$$L_p = 2 \times 68 + \frac{\pi}{2} \times (48 + 24) + \frac{(48 - 24)^2}{4 \times 68}$$

$$L_p = 251.2 \text{ [mm]} \approx 250 \text{ [mm]}$$

Por lo que se tiene que para las bandas de transmisión del motor al eje tienen las siguientes características.

Tabla 10**Características de correa.**

Características de correa	
Tipo de correa	HTD
Número de dientes rueda conductora	24
Número de dientes rueda conducida	48
Paso entre dientes [mm]	3
Longitud de correa [mm]	250

De la misma manera se selecciona las correas que se acoplan a las guías lineales, se toma en cuenta que se utilizan ruedas de transmisión de 24 dientes, existiendo así una relación de transmisión de 1:1 estas correas que cuentan con el mismo paso entre dientes de 3 mm, también son de perfil curvilíneo (HTD) y la longitud de la correa no es necesaria ya que para esta aplicación se usan correas abiertas que se acoplan a las ruedas como a las guías a criterio del técnico encargado del ensamblaje.

2. Sistema eléctrico/electrónico

2.1. Selección de tubo láser CO₂.

Para una correcta selección del tubo láser CO₂ se determina los parámetros a los cuales este va a trabajar, para así operar la maquina en buenas condiciones y el corte presente nitidez, es decir que sea un corte sin rebaba ni restos de astilla o deformaciones.

a) Selección de potencia del tubo láser CO₂ necesario para corte de 8 mm de madera.

Para realizar el cálculo de la potencia se necesita de una velocidad $V=0.5$ mm/s estimada ya que es considerada adecuada para cortes con profundidad de 8 mm debido a lo mencionado anteriormente ya que para mayor potencia se requiere de mayor velocidad, es por eso que en lo posible se considera una velocidad de corte insignificante para que de esta manera se pueda encontrar la menor potencia necesaria para realizar dicho corte a un espesor de 8 mm.

De la Ecuación 1 para el cálculo del coeficiente de acoplamiento de los diferentes tipos de madera propuestos se tiene:

$$\eta = \frac{wtV}{P} \times \rho [C_p \Delta T + L_f + m' L_v]$$

Donde:

L_f y L_v no son considerables, esto debido a que la madera en ninguna circunstancia pasa a estado líquido como se menciona en la sección 5.6 literal a del capítulo I.

$t = 8$ [mm] y $w = 1$ [mm].

- *Cálculo de potencia necesaria para corte del pino (amarillo).*

Según tabla 4 tenemos: $C_p=1298$ [J/kg°C] y $\rho= 650$ [kg/m³]; según la tabla 3 se tiene que $tV/P= 4.35 \times 10^{-8}$ [m²/J]

Considerando lo anteriormente mencionado para la temperatura final de la madera en el proceso de sublimación y tomando en cuenta la tabla 1 y la Ecuación 2 se tiene:

$$T_f=200 \text{ [°C]}; T_o=25 \text{ [°C]}$$

$$\Delta t = 200 - 25 = 175 \text{ °C}$$

Reemplazando se tiene:

$$\eta = 1 \times 10^{-3} \times 4.35 \times 10^{-8} \times 650 \times [1298 \times 175] = 6.42 \times 10^{-3}$$

De esta manera aplicando la Ecuación 1 de potencia para corte por sublimación láser se tiene:

$$P = \frac{1 \times 10^{-3} \times 8 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-4}}{6.42 \times 10^{-3}} \times 650 \times [1298 \times 175] = 91.95 \text{ [W]}$$

Considerando el análisis matemático anteriormente propuesto para el cálculo de coeficiente de acoplamiento, como potencia para el corte de madera de 8 mm de espesor con láser CO₂ se desarrolla la siguiente tabla:

Tabla 11**Potencias y coeficientes de acoplamiento de diferentes tipos de madera.**

Material	η	P (W)
Pino (amarillo)	0,006	92
Roble	0,014	104
Caoba	0,005	96
Madera prensada	0,006	92
Madera contrachapada	0,002	124

Como se puede apreciar tanto en el roble como el pino considerados como maderas duras facilitan su corte de 8 mm de espesor con un láser CO₂ con potencia promedio de 100 W.

Por lo que se considera que 100 W es suficiente para conseguir que el láser realice un corte adecuado a las necesidades propuestas.

b) Selección de velocidad de corte (penetración del láser).

Para calcular la velocidad necesaria de corte se estima los diámetros de haz del láser focalizado. Cuesta (2011) afirma:

“El mejor truco para obtener un buen corte, de aspecto casi pulido, en materiales orgánicos, es el empleo de aire comprimido a poca presión y utilizando boquillas con diámetro de 5 a 8 mm”. (p.54)

Utilizando la Ecuación 4, para el cálculo de densidad de potencia láser tomando en cuenta que la potencia estimada anteriormente es P=100 [W] y d=12 [mm] se tiene:

$$F_O = \frac{P \times 10^6}{\pi r^2}$$

$$F_O = \frac{100 \times 10^6}{\pi \times 3^2} = 3.537 \times 10^6 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

De esta manera se puede calcular la velocidad de corte de sublimación a través de la Ecuación 3, tomando en cuenta de lo anteriormente dicho que el calor latente de fusión y vaporización (L) no son considerables en la madera.

- *Cálculo de velocidad de corte en el pino (amarillo).*

Según Tabla 4 tenemos: $C_p=1298$ [J/kg°C] y $\rho= 650$ [kg/m³]; de lo anteriormente mencionado en la tabla 1 se tiene $T_v=900$ [°C] y $T_o=25$ [°C] tomándola como temperatura ambiente.

De esta manera se tiene que:

$$V = \frac{3.537 \times 10^6}{650 \times [1298 \times (900 - 25)]} = 0.005 \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Considerando el análisis matemático anteriormente propuesto para el cálculo de densidad de potencia láser y velocidad de corte para madera con láser CO₂ se tiene:

Tabla 12

Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de foco de 6 mm.

Material	F _o (W/m ²) X 10 ⁶ d=6 (mm)	V(mm/s)
Pino (amarillo)	3,537	4,790
Roble	3,537	1,993
Caoba	3,537	5,386
Madera prensada	3,537	4,881
Madera contrachapada	3,537	10,105

Tabla 13

Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de foco de 7 mm.

Material	F_0 (W/m ²) X 10 ⁶ d=7 (mm)	V(mm/s)
Pino (amarillo)	2,598	3,519
Roble	2,598	1,464
Caoba	2,598	3,957
Madera prensada	2,598	3,586
Madera contrachapada	2,598	7,424

Tabla 14

Densidades de potencia y velocidades de corte con diámetro de foco de 8 mm.

Material	F_0 (W/m ²) X 10 ⁶ d=8 (mm)	V(mm/s)
Pino (amarillo)	1,989	2,695
Roble	1,989	1,121
Caoba	1,989	3,030
Madera prensada	1,989	2,746
Madera contrachapada	1,989	5,684

A través de los cálculos de velocidades de corte frente a la potencia aplicada de acuerdo al diámetro de haz de láser, se tiene que a mayor potencia aplicada la velocidad de corte será mínima dependiendo de la capacidad máxima del tubo láser, en este caso la velocidad de corte que se aprecia en las tablas 12, 13 y 14 varía de 1,12 a 10,1 mm/s trabajando a su máxima capacidad (100 W).

c) Temperatura de Trabajo del tubo láser CO₂ para corte de madera.

Para determinar la temperatura de trabajo del láser necesaria para el corte de madera a través del proceso de corte por sublimación se necesita de la ecuación 8 en la cual se determina la temperatura que se encuentra el material en un momento t_v para lo que es necesario realizar un análisis con diferentes tiempos estimados, y se realiza un análisis con las densidades de potencia láser previamente calculadas en las tablas 12, 13 y 14.

- *Cálculo de temperatura en el proceso de corte láser para pino (amarillo).*

Tomando en cuenta la Tabla 4 tenemos las siguientes propiedades $K=0.163$ [W/mK] y $\alpha = 0.193 \times 10^{-6}$ [m²/s]; de la Tabla 12 $F_0 = 3.537$ [W/m²] y un tiempo estimado $t_v=60$ [s], aplicando estos datos a la ecuación 8 se tiene:

$$t_v = \frac{\pi}{\alpha \times \left[\frac{(T_B \times K)}{2F_0} \right]^2}$$

Donde:

$$T_B = \frac{2 \times 3.537}{0.163} \times \left(\frac{0.193 \times 10^{-6} \times 60}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.08 \text{ [K]}$$

Tomando en cuenta la temperatura ambiente a la que se encuentra la madera $t_0=298.15$ [K] y convirtiéndolo a grados centígrados se tiene:

$$T_{final} = 0.08 + 298.15 - 273.15 = 25.08 \text{ [°C]}$$

Mediante estos cálculos se realiza un análisis matemático de la temperatura superficial de la madera en un tiempo t_v para diferentes densidades de potencia láser de las tablas 12, 13 y 14 y las propiedades de la madera de la Tabla 4.

Tabla 15

Tabla de temperatura de superficie con diámetro de foco de 6 mm.

Material	F_0 (W/m ²) X 10 ⁶ d=6 [mm]	T_B (°C) $t_v=60$ [s]	T_B (°C) $t_v=300$ [s]
Pino (amarillo)	3,537	25,08	29,57
Roble	3,537	25,05	27,60
Caoba	3,537	25,08	29,36
Madera prensada	3,537	25,09	29,99
Madera contrachapada	3,537	25,11	30,96

Tabla 16

Tabla de temperatura de superficie con diámetro de foco de 7 mm.

Material	F_o (W/m ²) X 10 ⁶ d=7 (mm)	T _B (°C) t _v =60 [s]	T _B (°C) t _v =300 [s]
Pino (amarillo)	2,598	25,06	29,57
Roble	2,598	25,03	27,60
Caoba	2,598	25,06	29,36
Madera prensada	2,598	25,07	29,99
Madera contrachapada	2,598	25,08	30,96

Tabla 17

Tabla de temperatura de superficie con diámetro de foco de 8 mm.

Material	F_o (W/m ²) X 10 ⁶ d=8 (mm)	T _B (°C) t _v =60 [s]	T _B (°C) t _v =300 [s]
Pino (amarillo)	1,989	25,05	29,57
Roble	1,989	25,03	27,60
Caoba	1,989	25,04	29,36
Madera prensada	1,989	25,05	29,99
Madera contrachapada	1,989	25,06	30,95

A través de los cálculos realizados de la temperatura de trabajo frente a la potencia aplicada (100 W), como se puede apreciar en las tablas 15, 16 y 17, se tiene que el tubo láser debe soportar temperaturas de trabajo de aproximadamente 30 °C.

Tabla 18

Características de tubo láser CO₂.

Características de tubo láser CO ₂	
Potencia [W]	100
Temperatura de trabajo [° C]	30

Conforme al análisis realizado se ha optado por seleccionar productos de la empresa "Beijing Reci tecnología láser", esto debido a que es una unidad de investigación de alta tecnología que se dedica a la producción de tubos láser de dióxido de carbono.

Esta empresa cuenta con amplia gama de modelos y series de productos láser, para la aplicación de corte de madera. Se ha seleccionado la serie S la cual cuenta con varios tipos. Este modelo es considerado el más moderno de su clase y contribuye con la tercera generación de tubos láser CO₂ que la empresa ha producido.

Tabla 19

Selección de tubo láser CO₂.

Modelo	Potencia nominal [W]	Potencia máxima [W]	Tensión de disparo [kV]	Corriente de operación [mA]	Tiempo de vida [H]	Temperatura de trabajo [°C]
S2	80	100	20	27	10000	2° - 40°
S4	100	130	24	28	10000	2° - 40°
S6	130	160	28	30	10000	2° - 40°
S8	150	180	30	30	10000	2° - 40°

Fuente: (Power laser seller store, 2015)

Conforme a la tabla 19 se ha seleccionado el modelo de tubo láser Reci S4, ya que presenta las características necesarias mencionadas en la tabla 18.



Figura 52. Tubo láser CO₂ Reci S4.

Fuente: (Sign in china, 2015)

2.2. Selección de motores a pasos y sus controladores (drivers)

- *Par motor de retención*

Para determinar el par necesario en la aplicación de transporte de la cabeza láser se realiza el mismo procedimiento que se presenta en la sección 1.1 literal c del capítulo II, ya que su sistema de transmisión es el mismo.

A diferencia del anterior análisis este no se divide en dos cargas ya que el peso de la cabeza láser se encuentra acoplado directamente al patín 3, por lo que se tiene que la carga aplicada al riel es la suma del peso del patín ($W_p=0.88$ N) más el peso de la cabeza láser ($W_{CL}=4.9$ N).

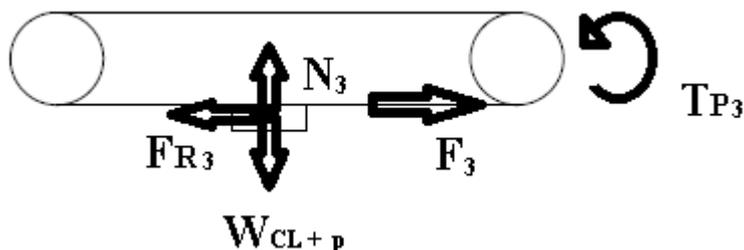


Figura 53. D.C.L de sistema de transmisión acoplado al patín 3.

De esta manera para el cálculo de la fuerza necesaria para arrastrar el patín 3 (F_3) se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$N_3 = 5.78 \text{ [N]}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_3 = \mu \times N_3 = 0.004 \times 5.78 = 0.023 \text{ [N]}$$

De manera que el par ejercido por el patín 3 en el sistema de transmisión rueda correa dentada, estimando un rendimiento de la rueda-correa (η) de 0.2, se tiene:

$$T_{P3} = \frac{F_3 D_3}{2\eta} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

D_3 : Diámetro de la rueda 1

F_3 : Carga lineal del patín 3.

η : Rendimiento del sistema de transmisión rueda correa.

$$T_{P_3} = \frac{0.023 \times 0.024}{2 \times 0.2} = 1.38 \times 10^{-3} [Nm]$$

- *Par inercial*

El momento de inercia de la polea 1 es:

$$J_{D_1} = \frac{1}{8} \times W_r \times D_1^2 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

W_r : Peso de la rueda.

D_1 : Diámetro de la polea.

Tomando en cuenta que la rueda tiene una masa de 0.5 [kg], y reemplazando en la ecuación 15 se tiene que:

$$J_{D_1} = \frac{1}{8} \times 0.5 \times 9.8 \times 0.024^2$$

$$J_{D_1} = 0.4 \times 10^{-3} [Nm^2]$$

A esto se le suma la inercia del sistema de transmisión (J_t) para obtener la inercia total, tomando en cuenta que la inercia de la polea 1 es igual a la inercia de la polea 2 ($J_{D_1}=J_{D_2}$).

$$J_T = J_{D_1} + J_{D_2} + J_t$$

Ec. 16

Previo al cálculo de la inercia total se necesita la inercia del sistema de transmisión (J_t), tomando en cuenta que se tiene 2 cargas de reacción con los patines (P_1, P_2) para poder determinarla se tiene:

- Para el momento de inercia en el patín 1 se tiene que:

$$J_1 = (4.9 + 77.4) \times \left(\frac{0.024}{2}\right)^2$$

$$J_1 = 12 \times 10^{-3} \text{ [Nm}^2\text{]}$$

- Para el momento de inercia en el patín 2 se tiene que:

$$J_2 = (4.9 + 89.8) \times \left(\frac{0.024}{2}\right)^2$$

$$J_2 = 14 \times 10^{-3} \text{ [Nm}^2\text{]}$$

Así se tiene que el momento de inercia total es:

$$J_t = J_1 + J_2 \text{ [Nm}^2\text{]}$$

$$J_t = 12 \times 10^{-3} + 14 \times 10^{-3} = 26 \times 10^{-3} \text{ [Nm}^2\text{]}$$

De manera que para el motor a pasos encargado de movilizar la cabeza láser debe tener la capacidad de generar un par de 1.38×10^{-3} [Nm], un momento inercial de 26×10^{-3} [Nm²] y una velocidad angular de 398 [rpm], mientras que el motor a pasos encargado de movilizar la estructura móvil del tubo láser debe tener la capacidad de generar un par de 40.2×10^{-3} [Nm], un momento inercial de 26×10^{-3} [Nm²] y una velocidad angular de 398 [rpm].

Tabla 20

Características de motores a pasos.

Características de motores a pasos			
Motor	Par [Nmm]	Vel. Angular [rpm]	Par inercial [gcm ²]
Motor cabeza láser	0,276	398	0,27
Motor estructura móvil del tubo láser	8	398	0,27

Conforme el análisis realizado se ha optado por la selección de un motor a pasos NEMA 23 para movilizar la cabeza láser y un motor a pasos NEMA 34 para movilizar la estructura del tubo láser.

La selección de este tipo de motores a pasos se debe a sus dimensiones, ya que su estructura es la más apropiada para el sistema.

Se seleccionó dos marcas que presentan dichas características, para el motor NEMA 23 se seleccionó la marca "Leadshine Technology" y para el motor NEMA 34. Se ha optado por la marca "Changzhou Rattm motor", presentando varios modelos y series que cumplen con las mismas características, para esto por motivos de accesibilidad a los productos se obtuvieron los siguientes:

Tabla 21

Selección de motor a pasos NEMA 23.

Selección de motor NEMA 23			
Modelo	Par motor de retención [Nm]	Corriente [A]	Inercia del rotor [gcm ²]
573S05	0,45	5,2	110
573S09	0,9	3,5	200
573S15	1,3	5,8	400

Fuente: (Leadshine Technology, 2015)

Tabla 22

Selección de motor a pasos NEMA 34.

Selección de motor NEMA 34			
Modelo	Par motor de retención [Nm]	Corriente [A]	Inercia del rotor [gcm ²]
34HS6802	29,4	5	0,85
34HS8802	34,3	5	1,05
34HS9802	54,9	5	1,55
34HS4802	83,4	5	1,8

Fuente: (Rattm motor cnc, 2015)

Como se puede apreciar en la tabla 21 y 22, todos los motores son compatibles según las características que se presentan en la tabla 20 por lo que se eligió los motores a pasos que presenten mayor torque, de manera que se mejore el sistema, teniendo que el motor que moviliza la cabeza láser es un Leadshine 573S15 y el motor que moviliza la estructura móvil del láser es un Rattm 34HS4802.

Se usan controladores (drivers) sugeridos por los distribuidores estos a su vez son específicamente diseñados para cada motor a pasos y son:

- *Leadshine 3ND583*

Se lo usa para el control de potencia del motor NEMA 23 Leadshine 573S15.



Figura 2.1. Controlador (driver) Leadshine 3ND583.

Fuente: (Leadshine Technology, 2015)

- *CW 8060*

Se lo usa para el control de potencia del motor NEMA 34 Rattm 34HS4802.



Figura 54. Controlador (driver) CW 8060.

Fuente: (Aliexpress, 2015)

2.3. Sistema de refrigeración.

Como elemento principal para la refrigeración del tubo láser CO₂ se tomó en cuenta los enfriadores de agua (Chiller), ya que estos cumplen la función de enfriar el agua que ingresa al tubo láser CO₂, como bomba de calor.

Se ha considerado los enfriadores de agua industriales de la marca CW estos presentan algunos modelos, cada uno trabaja con diferentes potencias de tubo láser CO₂.

Tabla 23

Selección de enfriador de agua.

Selección de enfriador de agua		
Modelo	Potencia láser CO ₂ [W]	Numero de tubos láser a enfriar
CW-3000	20 – 100	1
CW-5000	20 – 100	3
CW-6000	20-100	4

Como se puede apreciar esta marca proporciona la capacidad de refrigeración de tubos láser, esto se debe a que cada modelo de enfriador de agua contiene mayor capacidad de almacenamiento de agua lo que permite que se pueda trabajar con mayor cantidad de tubos láser CO₂ al mismo tiempo.

En este caso únicamente se va a trabajar con un tubo láser, lo que lleva a que se elija el modelo CW-3000.

2.4. Alimentación de dispositivos eléctricos.

Los dispositivos eléctricos que conforman el sistema necesitan de alimentación a través de dispositivos de potencia estos son los encargados de convertir e incrementar la capacidad de energía, para que se abastezcan conforme a la necesidad de cada uno de los dispositivos (motores, DSP, tubo láser).

a) Alimentación del tubo láser CO₂.

Se usa una fuente sugerida por el distribuidor (Beijing Reci tecnología de láser), el mismo que menciona tres tipos de fuentes de alimentación, cada uno funcional para los diferentes tipos del modelo seleccionado de tubo láser CO₂, estos se clasifican según su potencia.

En este caso se determinó en la sección 2.1, literal c del capítulo II, que el tubo láser más adecuado para la aplicación, es el tubo láser Reci S4. Tomando en cuenta lo expuesto se determina lo siguiente:

Tabla 24

Selección de la fuente de alimentación de tubo láser CO₂.

Modelo de fuente de alimentación Reci	Modelo de tubo láser CO ₂ Reci	Potencia de salida [W]
DY10	W2, Z2, S2	80, 90
DY13	W4, Z4, S4	100, 120
DY20	W6, W8, Z6, Z8, S6, S8	130, 150, 170

Fuente: (Product overview, 2015)

De esta manera como se aprecia en la tabla 19 se tiene que la fuente de alimentación Reci DY13 es la más apropiada según las indicaciones del distribuidor, cuyas características son:

- Especialmente diseñado para tubo láser Reci de 100 W – 120 W.
- Respuesta rápida, se puede ampliar la potencia del láser y prolongar la vida útil del tubo láser.
- Fácil control, el arranque y la parada del láser se pueden controlar fácilmente por nivel TTL.
- Tiene una salida de protección de circuito abierto.

- Indicación de agua a través de indicación por señal TTL y salida láser.
- Tiene un botón para probar que funciona correctamente.
- Aplicación en la escultura y el corte de acrílico, tela, hoja de doble color, caucho, madera, etc.

b) Alimentación de motores a pasos.

La alimentación de sus drivers requiere una corriente de 3 A y un voltaje mínimo de 24 V DC.

Para esto se ha seleccionado una fuente de 48 V DC y 7.3 A de marca Mingway, la misma que se encarga de alimentar los dos motores a pasos.

3. Sistema de control

El sistema de control necesariamente cuenta con un sistema CAD, éste como se mencionó anteriormente se lo desarrollara a través de una tarjeta DSP, cuyas características básicas son el formato aritmético, la velocidad, la organización de la memoria o la arquitectura interna.

Estas tarjetas DSP utilizan arquitecturas especiales y cálculos matemáticos intensos implicados en el sistema de control numérico, en este caso se dispone de varios modelos de tarjetas DSP con la aplicación de corte láser, para lo cual se ha tomado en cuenta que para su elección la tarjeta DSP cumpla con los cuatro componentes mayoritarios que se exponen en la sección 6.3 del capítulo I.

Tabla 25**Selección de tarjeta DSP.**

Selección de tarjeta DSP					
Modelo	Aplicación	Comunicación	Control de tubo láser	Ejes coordenados	Software compatible
RD320	Corte, Grabado	USB	SI	X, Y, Z, u	Autocad, Coreldraw
MPC6565	Corte, Grabado	USB	NO	X, Y, Z	Autocad, Coreldraw, Word file
AWC708C	Corte, Grabado	USB	SI	X, Y, Z, u	Autocad, CorelDraw, laser cad
AWC608	Corte, Grabado	USB	NO	X, Y, Z, u	AutoCAD, CorelDraw, laser cad
RDC6332G	Corte, Grabado	USB, Ethernet	SI	X, Y, Z	CorelDraw
PH03	Corte, Grabado	USB	SI	X, Y, Z, u	AutoCAD
TL403C	Corte, Grabado	USB	SI	X, Y, Z, u	AutoCAD, CorelDraw

La elección de la tarjeta se basa netamente en la facilidad que el distribuidor presenta, en este caso es el software CAD, este software llamado "Laser Cad" permite realizar los diseños y cargarlos en la memoria de la tarjeta a través de una conexión por cable USB. También presenta la particularidad de control de 4 ejes los cuales son X, Y, Z y u el cual es el eje de control de la fuente de alimentación.

CAPITULO III

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

1. Implementación del sistema mecánico.

Con el diseño de la mesa de tipo pórtico y efectuada la selección de los sistemas de transmisión y guías lineales, lo único que queda por realizar es la construcción y ensamblaje de su sistema mecánico.

1.1. Proceso de construcción de la estructura de la mesa tipo pórtico.

Disponiendo del diseño del bastidor de la mesa tipo pórtico, se vuelve sencillo construir su estructura final. Se cuenta con varias partes las cuales son adaptadas a través de sujeciones mecánicas que permiten que la estructura se pueda desensamblar.



Figura 55. Bastidor de mesa tipo pórtico.

Tabla 26**Equipo de manufactura para construcción de la mesa de tipo pórtico.**

Partes del chasis	Herramientas	Instrumentos de medida	Equipo de manufactura
Puertas izquierdas laterales	Taladro	Cinta métrica	Dobladora
Puertas derechas laterales	Juego de tubos Stanley	Pie de rey	Cizalla
Lamina de acero de transmisión para estructura izquierda lateral	Destornillador plano y estrella		
Lamina de acero de transmisión para estructura derecha lateral	Brocas		
Lamina de acero de transmisión para estructura frontal			
Lamina de acero de transmisión para estructura trasera			
Puerta para la caja del sistema electrónico			
Puerta frontal para cubierta de la mesa			
Puerta trasera para cubierta de la mesa			
Malla para soporte de material			

En una lámina de acero AISI 1020 de 3 mm de espesor y el plano del chasis, se toman las medidas correspondientes para realizar un corte adecuado de la sección lateral izquierda, sección lateral derecha, sección frontal y sección trasera en las láminas de acero mediante una cizalla.

Con un taladro se perfora en los extremos de las láminas cortadas para adecuarlas a la estructura de la mesa, esto se lo realiza con una broca para metal de 4 mm, de manera que se puedan adecuar las láminas en la estructura con tornillos autorroscantes, con un tubo Stanley adaptado al taladro.



Figura 56. Armazón ensamblado de la mesa tipo pórtico.

Con las medidas del plano se marca en las láminas el contorno de las puertas de la sección lateral izquierda, sección lateral derecha y sección frontal de manera que se la pueda cortar con la cizalla.

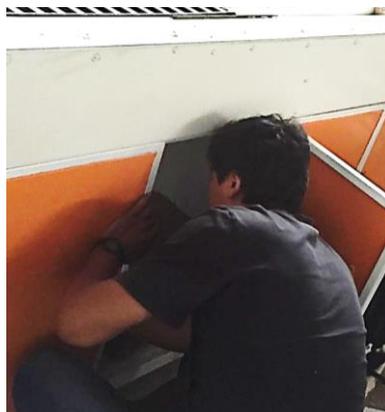


Figura 57. Ensamble de puertas.

Las secciones periféricas de cada diseño cortadas anteriormente se las dobla a 90° , de manera que encajen en los marcos de las puertas. Para que los diseños de las láminas encajen en sus respectivos marcos se perfora con una broca de 10 mm adaptada a un taladro y a los sistemas de puertas se adapta una cerradura de llave triangular.



Figura 58. Puerta de secciones laterales.

Como punto final se adapta dichas puertas en cada sección correspondiente de las puertas a través de bisagras de 3 [in].



Figura 59. Puerta de sección frontal.

Con el bastidor de la puerta frontal y la puerta trasera para cubierta de la mesa, se realiza las medidas pertinentes de sus orificios, esto para realizar los cortes necesarios en el acrílico que se lo coloca sobre la estructura. Al acrílico cortado se lo adhiere a los marcos de las puertas de manera que se fijen plenamente y se los pueda adaptar a la estructura con bisagras de 3 [in].



Figura 60. Ensamble de puertas para cubierta de mesa tipo pórtico.

Cumpliendo la función de cubrir y permitir el acceso a las planchas de madera.

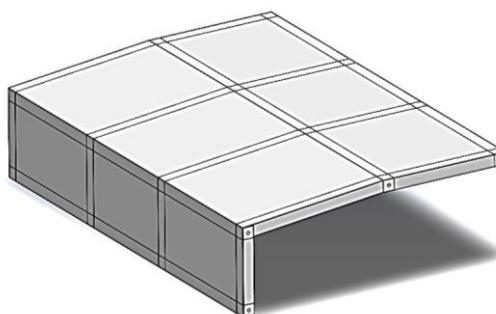


Figura 61. Puerta frontal para cubierta de la mesa.

Como paso final se realiza el montaje de una malla, cuya funcionalidad es la de retener y servir como base del material para que este sea procesado, para esto tendrá que contar con separaciones entre perfiles de acero fundido para que los residuos del material pasen sin problema alguno.

Las pletinas de aluminio son soldadas a una distancia de 10 mm entre sí en un marco de 5060 mm de longitud y 2760 de ancho.

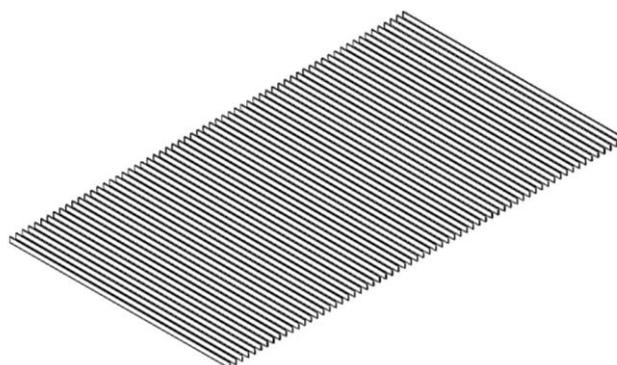


Figura 62. Malla para soporte de material.

1.2. Ensamble de guías lineales.

a) Rieles para unión

Los rieles para unión se montaron siguiendo el sentido de la flecha y el número de orden con el cual es marcada la superficie de cada riel.

Cuando unos conjuntos de rieles de unión van montados en paralelo, en lo posible de forma escalonada para evitar así, problemas de falta de precisión, debido a las discrepancias entre los dos rieles en paralelo.

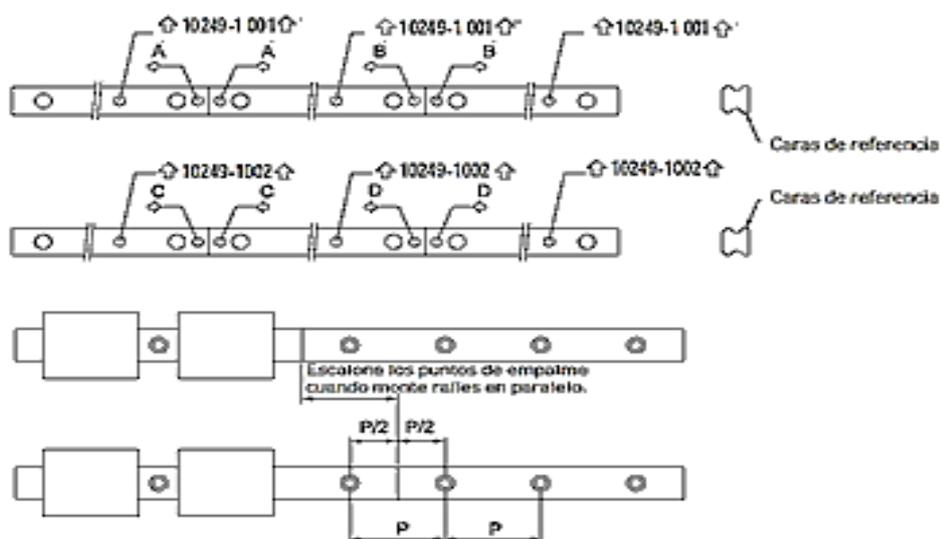


Figura 63. Montaje de rieles.

Fuente: (GAES, 2015)

b) Procedimiento de montaje.

Para obtener una buena precisión Hiwin recomienda varias configuraciones de lo cual se seleccionó el montaje con tornillos de sujeción.

Montaje con tornillos de sujeción

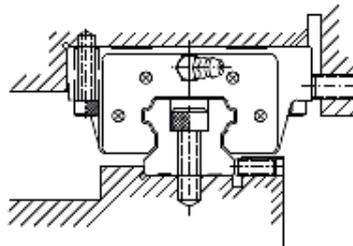


Figura 64. Montaje con tornillos de sujeción.

Fuente: (GAES, 2015)

Para la instalación de los rieles guía se consideran los siguientes pasos:

- 1) Quitar toda la suciedad de la superficie de montaje.

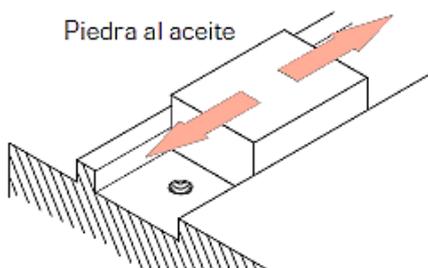


Figura 65. Limpieza de la superficie.

Fuente: (GAES, 2015)

- 2) Colocar cuidadosamente la guía lineal en la bancada. Presionar el riel guía contra la superficie de referencia.

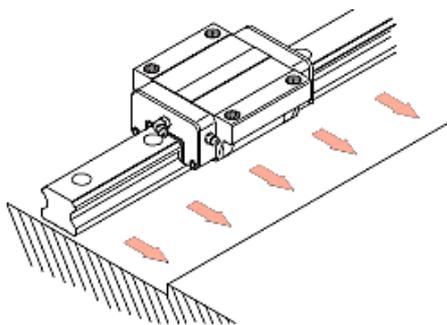


Figura 66. Aplicación del riel contra la superficie.

Fuente: (GAES, 2015)

- 3) Comprobar que los taladros de fijación de las guías coincidan con los de la bancada y que los tornillos giren suavemente.

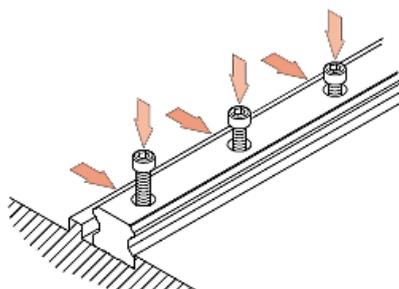


Figura 67. Implementación de tornillos del riel.

Fuente: (GAES, 2015)

- 4) Ajustar los tornillos de fijación en el riel guía hasta que haya un estrecho contacto en la superficie lateral de referencia.

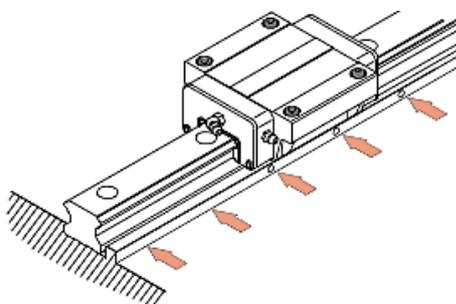


Figura 68. Implementación de tornillos de fijación del riel.

Fuente: (GAES, 2015)

- 5) Ajustar los tornillos con una llave dinamométrica, con el par de apriete especificado.

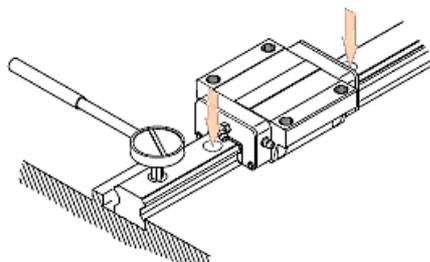


Figura 69. Ajuste de tornillos del riel.

Fuente: (GAES, 2015)

- 6) Instalar el resto de guías lineales siguiendo el mismo procedimiento.

c) Procedimiento para instalación de los patines.

- 1) Se sitúa el tablero suavemente sobre los patines. Luego se ajusta los tornillos temporalmente.
- 2) Se presiona los patines en el lado principal de la guía mediante los tornillos de fijación contra el lado de referencia de la mesa y alinear la mesa.
- 3) El tablero puede quedar fijo de forma uniforme ajustando los tornillos de fijación sobre el lado de la guía principal y luego en la secundaria en orden entrecruzado.

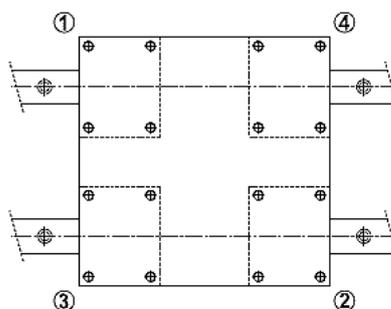


Figura 70. Instalación del tablero en los patines.

Fuente: (GAES, 2015)

1.3. Ensamble de sistema de transmisión del eje X.

Tabla 27

Equipo de manufactura para construcción del sistema de transmisión del eje X.

Partes de la transmisión	Herramientas	Instrumentos de medida	Equipo de manufactura
Soporte de motor a pasos	Taladro	Cinta métrica	-
Soporte eje de transmisión izquierdo	Llave inglesa	Pie de rey	-
Soporte eje de transmisión derecho	Destornillador plano y estrella		
Correa HTD cerrada	Sierra		
Correa HTD abierta	Juego de tubos Stanley		

Con un taladro se perfora en la estructura móvil del eje X con una broca de metal de 5 mm, según el plano para el soporte de motor a pasos, tomando un destornillador estrella se ajusta el soporte del motor a pasos en la estructura con tornillos autorroscantes.

Consecuentemente se adapta el motor a pasos NEMA 23 en su soporte, ajustándolo adecuadamente con el destornillador estrella y la llave inglesa sus tornillos y tuercas consecuentemente.

De la misma manera se adapta el eje de transmisión izquierdo en la estructura móvil del eje X y en este se monta las ruedas de 48 dientes alineando a la rueda acoplada al eje del motor y la de 24 dientes en el centro del soporte, estas ruedas se ajustan al eje a través de prisioneros, para que la correa HTD cerrada se la pueda adaptar a la rueda acoplada al motor y la rueda de 48 dientes, para facilitar su adaptación se desajusta ligeramente las tuercas que sujetan al motor hasta que la correa ingrese en las dos ruedas, al realizar este procedimiento se ajusta nuevamente las tuercas hasta que el motor y la correa encajen plenamente al sistema.

Para montar la rueda de 24 dientes se la alinea al centro del soporte, tomando en cuenta que las dos ruedas de 24 dientes de los soportes de ejes se deben encontrar paralelos el uno del otro.

Con el rollo de la correa HTD abierta, se acopla a las ruedas paralelas de 24 dientes, conforme sea necesario estirando la correa y cortándola hasta que esta se la pueda acoplar con la placa de acero de transmisión ensamblada al patín 3 y la cabeza láser, estas correas se las acopla a sus extremos a través de tornillos, 2 por cada extremo de manera que la banda quede firme y ajustada entre las ruedas paralelas.



Figura 71. Estructura móvil del eje X ensamblada.

1.4. Ensamble de sistema de transmisión eje Y.

Tabla 28**Equipo de manufactura para construcción del sistema de transmisión del eje Y.**

Partes de la transmisión	Herramientas	Instrumentos de medida	Equipo de manufactura
Soporte de motor a pasos	Taladro	Cinta métrica	-
2 chumaceras de 1 pulgada	Llave inglesa	Pie de rey	-
2 Soportes eje de transmisión	Destornillador plano y estrella		
1 eje de transmisión de 1,8 m de longitud	Sierra		
Correa HTD cerrada	Juego de tubos Stanley		
Correa HTD abierta			
2 Placas metálicas de 80 mm x 80 mm			

Para el motor a pasos NEMA 34, se lo ajusta en su soporte con el destornillador estrella y la llave inglesa, sus tornillos y tuercas consecuentemente.

Utilizando un taladro se perfora la mesa de tipo pórtico con una broca de metal de 5 mm, según el plano para las chumaceras, para así ajustarlas en la estructura, esto con tornillos autorroscantes.

Permitiéndose así adaptar las ruedas de 48 dientes, alineándolas a la rueda acoplada al eje del motor y la de 24 dientes en el tope del eje marcado, estas ruedas se ajustan al eje a través de prisioneros. De esta manera se puede adaptar la correa HTD cerrada a la rueda acoplada al motor y la rueda de 48 dientes, para facilitar su adaptación se desajusta ligeramente las tuercas que sujetan al motor hasta que la correa ingresa en las dos ruedas, al realizar este procedimiento se ajusta nuevamente las tuercas hasta que el motor y la correa se adapten plenamente al sistema.



Figura 72. Implementación del sistema de transmisión del motor a pasos.

Tomando el taladro se realiza agujeros de 5 mm en la estructura como indica el plano y se monta la rueda de 24 dientes alineándolo al centro del soporte, tomando en cuenta que las ruedas de 24 dientes de los soportes de ejes y del eje de transmisión se deben encontrar paralelos el uno del otro.

Con el rollo de correa HTD abierta, se acopla a las ruedas paralelas de 24 dientes, conforme sea necesario, estirando y cortando la correa hasta que este alcance la placa de acero de transmisión de 80 mm x 80 mm acoplada a los patines 1 y 2 y a los extremos de la bancada del eje Y.



Figura 73. Banda implementada a lo largo del eje Y.

Como punto final se adapta los extremos de las correas con tornillos, 2 por cada extremo de manera que la banda quede firme y ajustada entre las ruedas paralelas.

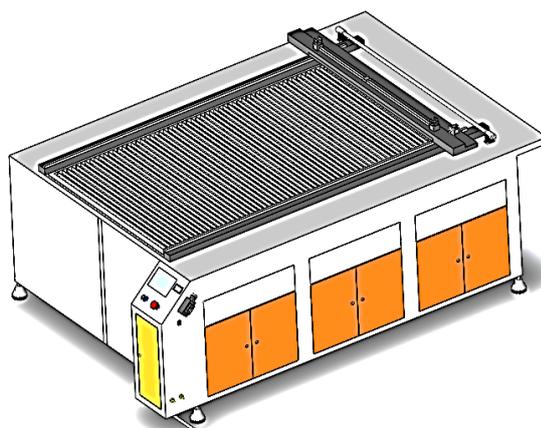


Figura 74. Estructura con el acople del sistema de transmisión del eje X e Y.

2. Implementación del sistema eléctrico/electrónico.

Tabla 29

Instrumentos de medida para la implementación del sistema eléctrico/electrónico.

Elementos eléctricos y electrónicos	Herramientas	Instrumentos de medida
Tarjeta DSP	Peladora de cable	Multímetro
Motores a pasos	Cortadora de cable	
Cable AWG 14	Cautín	
Cable AWG 16	Estaño	
Fuente de voltaje de 24 VDC	Destornillador estrella	
Fuente de voltaje de 48 VDC		
Tubo láser CO ₂		
Fuente del tubo láser		
Driver de motor a pasos NEMA 23		
Driver de motor a pasos NEMA 34		
finales de carrera		

Mediante el manual de la tarjeta DSP se lleva a cabo las indicaciones pertinentes de manera que se pueda cortar y pelar el cable AWG 16 para así realizar las conexiones

entre las salidas de la tarjeta DSP y los dispositivos de salida que se van a controlar, consecutivamente se conectan las bobinas de los motores a pasos NEMA 23 y 34 a los pines de salida del controlador (driver) según corresponda, con cable AWG 16. Tomando muy en cuenta que los motores a pasos son alimentados a través de una fuente de 48 VDC.

Los terminales de los controladores (drivers) son conectados a los pines de salida de la tarjeta DSP y los finales de carrera a los pines de salida de la tarjeta DSP según indique el manual de especificaciones, con cable AWG 16.

Cortando y pelando cable AWG 14 se realiza las conexiones del tubo láser CO₂, conectando el ánodo y cátodo del tubo láser CO₂ a los pines de salida de la fuente del tubo láser según corresponda.

Para alimentar el sistema eléctrico del tubo láser CO₂, se empieza desde la conexión a una red de 220 V AC y los terminales de control de la fuente láser a los pines de salida de la tarjeta DSP según indica el manual de especificaciones de la tarjeta DSP.

2.1. Implementación del sistema del tubo láser CO₂.

a) Conexión del tubo láser CO₂ a la fuente láser.

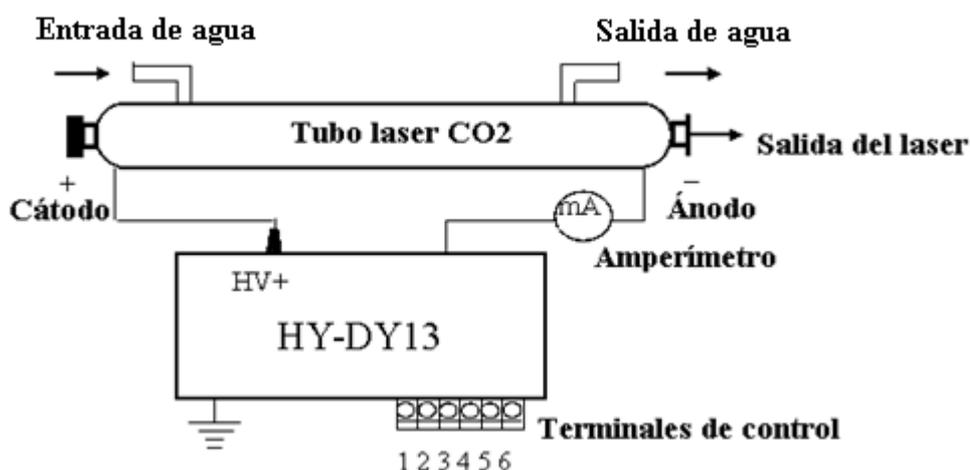


Figura 75. Diagrama de conexión del tubo láser.

Fuente: (Product overview, 2015)

Tabla 30**Definición de los terminales de la fuente láser.**

Definición de los terminales					
1	2	3	4	5	6
5 V	Th	Tl	WP	G	En

Terminal 1: 5 VDC, la corriente máxima de salida es 20 mA.

Terminal 2: Control del láser: nivel de alta potencia ($th \geq 3V$).

Terminal 3: Control del láser: nivel de baja potencia ($tl \geq 0.3V$).

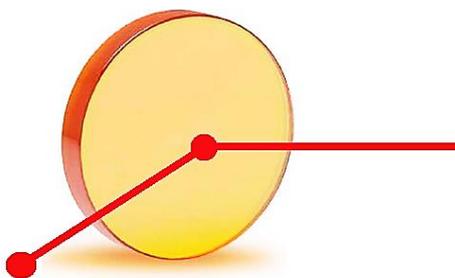
Terminal 4: Señal de protección de entrada y salida del agua.

Terminal 5: Tierra del sistema.

Terminal 6: Control de la potencia del láser: señal analógica 0-5 V y la señal PWM pueden controlar la potencia del láser.

b) Implementación del sistema de reflexión.

Al salir el haz de luz del tubo láser CO₂ este no se direcciona directamente a la cabeza del láser por lo que se requiere de un sistema de reflexión a través de espejos para que este se direcciona a su cabeza láser, tomando en cuenta que para esto se necesita de tres espejos que realicen dicho proceso. Estos espejos deben desviar el haz de luz a un ángulo de 90° consecuentemente desde el haz de luz que nace del tubo láser.

**Figura 76. Representación de haz reflejado en el espejo.**

- El primer espejo se lo adapta a su soporte el mismo que se lo instala a un extremo de la estructura móvil del eje X, este se ubica frente a la salida del tubo láser con una inclinación de 135° con el objetivo de que el haz de láser que recibe de la salida del tubo láser se refleje a 90° .

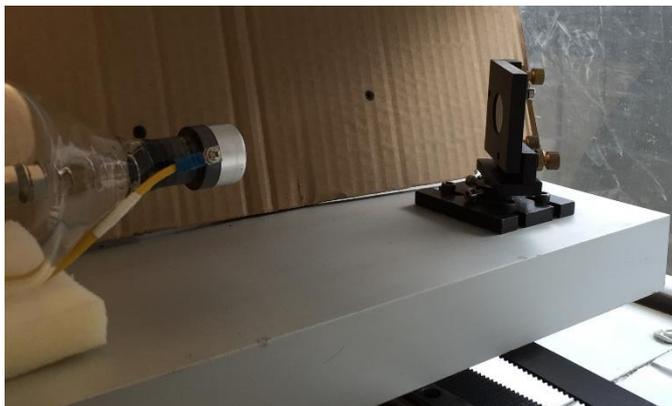


Figura 77. Primer espejo del sistema de reflexión.

- El segundo espejo se lo adapta a su soporte el mismo que se lo instala a un extremo de la estructura móvil del eje X, este se ubica frente al primer espejo con una inclinación de 135° con el objetivo de que el haz de láser que proviene del primer espejo se refleje a 90° .

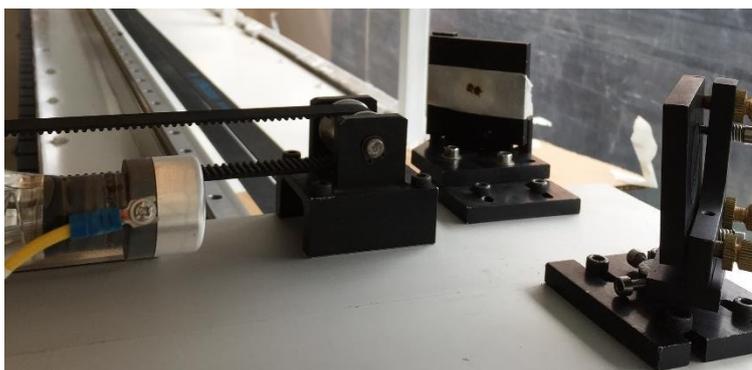


Figura 78. Segundo espejo del sistema de reflexión.

- El tercer espejo se lo adapta a la cabeza del láser que se lo ensambla al patín 3, de manera que la cabeza del láser recorra todo el eje X del sistema robótico, este espejo se ubica frente al segundo espejo con una inclinación de 45° entre la estructura móvil del eje X y la punta de la boquilla láser con

el objetivo de que el haz de láser que proviene del segundo espejo se refleje a 90° hacia el lente óptico de la cabeza láser.

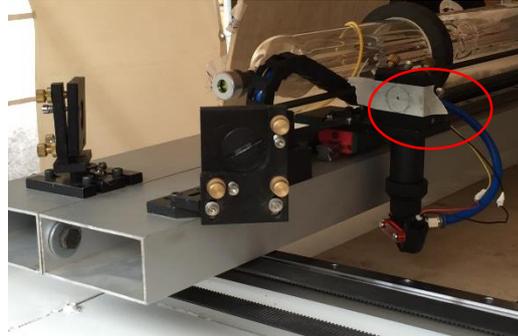


Figura 79. Tercer espejo del sistema de reflexión.

Cada espejo tiene un diámetro de 24 mm y todos se encuentran ubicados sobre la estructura móvil del eje X de manera que tanto su sistema de reflexión láser como el tubo láser se transportan a lo largo del eje Y.

2.2. Implementación de motores a pasos.

a) *Conexión del motor a pasos NEMA 34 a su controlador (driver).*

El controlador (driver) CW8060 presenta el nombre de cada uno de sus terminales de salida, cuya función es la siguiente:



Figura 80. Motor NEMA 34 a su controlador (driver).

- Terminal VCC: alimentación de corriente continua polo positivo; VCC $\leq 70V$.
- Terminal GND: cátodo de alimentación de corriente continua.

- Terminal A+: conexión al devanado del motor, cable de color rojo.
- Terminal A-: conexión al devanado del motor, cable de color verde.
- Terminal B+: conexión al devanado del motor, cable de color amarillo.
- Terminal B-: conexión al devanado del motor, cable de color azul.
- Terminal CP+: pulso de entrada 5V, flanco ascendente.
- Terminal CP-: pulso de entrada 5V, flanco descendente.
- Terminal CW+: entrada de dirección del motor a pasos, dirección en sentido horario.
- Terminal CW-: entrada de dirección del motor a pasos, dirección en sentido anti horario.
- Terminal EN+: habilita el motor con flanco ascendente.
- Terminal EN-: habilita el motor con flanco descendente.

b) Conexión del motor a pasos NEMA 23 a su controlador (driver).

El controlador (driver) 3ND583 presenta el nombre de cada uno de sus terminales de salida, cuya función es la siguiente:



Figura 81. Motor NEMA 23 a su controlador (driver).

- Terminal GND: cátodo de alimentación de corriente continua.
- Terminal +20 to 50 VDC: alimentación de corriente continua polo positivo; $20 \leq VCC \leq 50V$.
- Terminal U: conexión a fase U del motor, cables de color blanco y amarillo.
- Terminal V: conexión a fase V del motor, cables de color negro y verde.
- Terminal W: conexión a fase W del motor, cables de color rojo y azul.
- Terminal PUL+: pulso de entrada 4V-5V, flanco ascendente.
- Terminal PUL-: pulso de entrada 0V-0.5V, flanco descendente.
- Terminal DIR+: entrada de dirección del motor a pasos, dirección en sentido horario.
- Terminal DIR-: entrada de dirección del motor a pasos, dirección en sentido anti horario.
- Terminal ENA+: habilita el motor con flanco ascendente.
- Terminal ENA-: deshabilita el motor con flanco descendente.

2.3. Implementación de enfriador de agua.

Como primer punto se conecta la tubería del enfriador de agua al láser, ajustando la salida de la tubería de acuerdo con el flujo del agua que fluya de abajo para arriba. Asegurando que el enfriador de agua se encuentra lleno de agua y no tenga burbujas.

Su conexión es muy sencilla ya que se conecta la tubería de entrada del enfriador a la boquilla de entrada de agua fría del tubo láser, ajustándolo de manera que no existan fugas.

También se conecta la tubería de salida del enfriador a la boquilla de salida de agua caliente y vapor del tubo láser, ajustándolo de manera que no existan fugas.



Figura 82. Suministro de agua destilada al enfriador de agua

3. Implementación del sistema de control.

Como los anteriores elementos la tarjeta DSP cuenta con pines de salida que se distinguen por su funcionamiento único y de fácil comprensión al momento de su conexión con los diferentes elementos electrónicos que conforman el sistema.

Siguiendo la secuencia de cada uno de los pines que se presentan en la tarjeta DSP, se adapta de manera sencilla los dispositivos electrónicos que se encargara de controlar.

CAPITULO IV

PRUEBAS DE OPERACIÓN

1. Parámetros de corte.

En las siguientes tablas se representa los valores de potencia y velocidad más adecuados para obtener un corte limpio en un tiempo considerable, en los diferentes tipos de madera, cuyas planchas tienen diferentes espesores.

a) Parámetros de corte láser CO₂ en MDF.

Tabla 31

Parámetros de corte en MDF

Espesor [mm]	Potencia (100 W) (P1,P2) [%]	Velocidad [mm/s]
3	70-60	30
4	70-60	28
9	85-77	8

b) Parámetros de corte láser CO₂ en aglomerado.

Tabla 32

Parámetros de corte en aglomerado.

Espesor [mm]	Potencia (100 W) (P1,P2) [%]	Velocidad [mm]
4	76-70	24
9	90-80	7

Estos parámetros se los obtuvo a través de varias pruebas, variando potencia y velocidad, hasta que se encontró los valores que cumplen un buen desempeño en el corte.

2. Resultados.

Los siguientes resultados representan las pruebas de corte realizados con un tubo láser CO₂, generando una circunferencia y un cuadrado en la superficie de los diferentes tipos de madera propuestos, estas pruebas se las realizo con el fin de medir la precisión del corte en madera.

2.1. Corte láser CO₂ en MDF.

a) Corte láser CO₂ en MDF de 3 mm de espesor.

Tabla 33

Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 3 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Circunferencia	10	10	10,4	9,7	4	3
			10,4	9,7	4	3
			10	9,5	0	5
			10,3	9,8	3	2
			10,3	9,6	3	4
			10,2	9,7	2	3
			10,2	9,6	2	4
			10,3	9,6	3	4
			10,2	9,7	2	3
			10,1	9,7	1	3
			Promedio	2,4	3,4	

Tabla 34

Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 3 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Cuadrado	20	20	20	20	0	0
			20,1	20	0,5	0
			20,1	20,1	0,5	0,5
			20	20	0	0
			20	19,8	0	1
			20	19,8	0	1
			20	20	0	0
			20	19,8	0	1
			20	20	0	0
			20	20	0	0
			Promedio	0,1	0,4	

b) Corte láser CO₂ en MDF de 4 mm de espesor.

Tabla 35

Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 4 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Circunferencia	10	10	10,2	9,6	2	4
			10,3	9,7	3	3
			10,2	9,7	2	3
			10,3	9,7	3	3
			10,2	9,6	2	4
			10,2	9,6	2	4
			10,3	9,7	3	3
			10,3	9,6	3	4
			10,3	9,7	3	3
			10,3	9,7	3	3
			Promedio	2,6	3,4	

Tabla 36

Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 4 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano X	Plano Y	Plano x	Plano Y
Cuadrado	20	20	20	20	0	0
			20	20,1	0	0,5
			20,1	20,1	0,5	0,5
			20	20,1	0	0,5
			20	20	0	0
			20	19,9	0	0,5
			20	19,9	0	0,5
			20	19,9	0	0,5
			20,1	20	0,5	0
			20	20	0	0
			Promedio	0,1	0,3	

c) Corte láser CO₂ en MDF de 9 mm de espesor.

Tabla 37

Cálculo de error en corte de una circunferencia en MDF de 9mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Circunferencia	10	10	10	9,6	0	4
			9,9	9,6	1	4
			9,8	9,7	2	3
			10	10,1	0	1
			9,7	9,8	3	2
			9,6	9,9	4	1
			9,6	9,5	4	5
			9,8	9,7	2	3
			9,8	9,9	2	1
			9,9	10	1	0
			Promedio	1,9	2,4	

Tabla 38

Cálculo de error en corte de un cuadrado en MDF de 9 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Cuadrado	20	20	20	19,9	0	0,5
			19,9	19,9	0,5	0,5
			19,8	19,9	1	0,5
			19,7	19,7	1,5	1,5
			19,8	19,9	1	0,5
			20	20	0	0
			19,9	19,8	0,5	1
			19,8	19,8	1	1
			19,7	19,7	1,5	1,5
			19,8	19,9	1	0,5
			Promedio	0,8	0,75	

2.2. Corte láser CO₂ en aglomerado.

a) Corte láser CO₂ en aglomerado de 4 mm de espesor.

Tabla 39

Cálculo de error en corte de una circunferencia en aglomerado de 4 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Circunferencia	10	10	10,2	9,6	2	4
			10,1	9,7	1	3
			10,3	9,7	3	3
			10,2	9,6	2	4
			10,2	9,7	2	3
			10,1	9,5	1	5
			10,1	9,3	1	7
			10,1	9,6	1	4
			10,1	9,5	1	5
			9,9	9,7	1	3
			Promedio	1,5	4,1	

Tabla 40

Cálculo de error en corte de un cuadrado en aglomerado de 4 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Cuadrado	20	20	20	20,1	0	0,5
			20	20	0	0
			20	20,1	0	0,5
			20	20	0	0
			20	20,1	0	0,5
			19,9	20,3	0,5	1,5
			19,9	20,2	0,5	1
			20	20,3	0	1,5
			20	20,2	0	1
			9,9	20	50,5	0
			Promedio	5,15	0,65	

b) Corte láser CO₂ en aglomerado de 9 mm de espesor.

Tabla 41

Cálculo de error en corte de una circunferencia en aglomerado de 9 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Circunferencia	10	10	9,8	10,1	2	1
			9,6	9,9	4	1
			9,6	9,9	4	1
			9,8	9,7	2	3
			9,7	9,9	3	1
			9,7	10	3	0
			9,8	9,9	2	1
			9,6	9,8	4	2
			9,6	9,8	4	2
			9,7	9,7	3	3
			Promedio	3,1	1,5	

Tabla 42

Cálculo de error en corte de un cuadrado en aglomerado de 9 mm.

Figura	Valores reales [mm]		Valores medidos		Error %	
	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y	Plano x	Plano Y
Cuadrado	20	20	19,9	20	0,5	0
			19,8	19,9	1	0,5
			19,9	19,9	0,5	0,5
			19,9	20	0,5	0
			19,8	19,9	1	0,5
			19,9	20	0,5	0
			19,9	20	0,5	0
			19,8	19,9	1	0,5
			19,8	19,8	1	1
			19,9	19,9	0,5	0,5
			Promedio	0,7	0,35	

3. Análisis de Resultados.

3.1. Corte láser CO₂ en MDF.

a) Corte láser CO₂ en MDF de 3 mm de espesor.

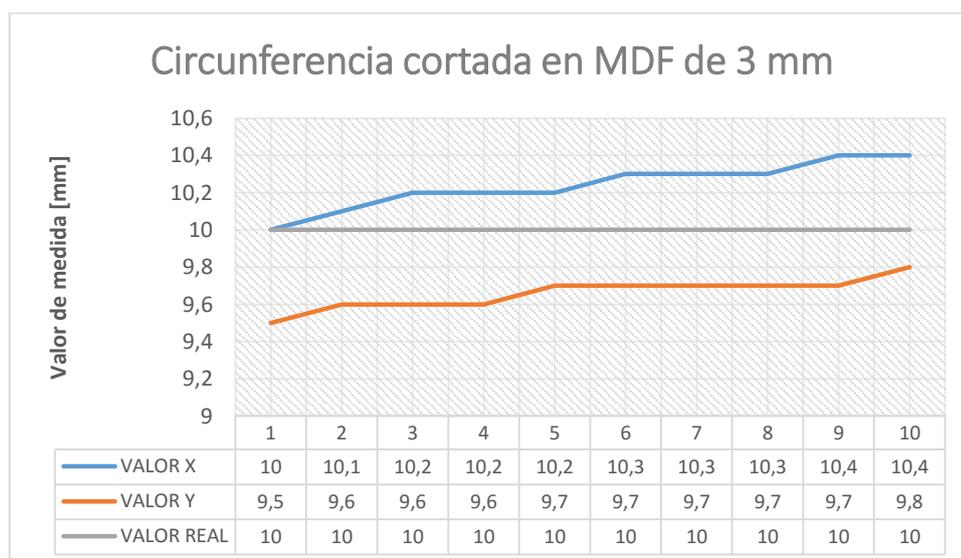


Figura 84. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 3 mm.

Como se puede apreciar en la figura 84, se tiene como límite inferior de error de 9,5 y límite superior de 10,4 obteniendo así la precisión de corte de 0,9 mm para una circunferencia en MDF con espesor de 3 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

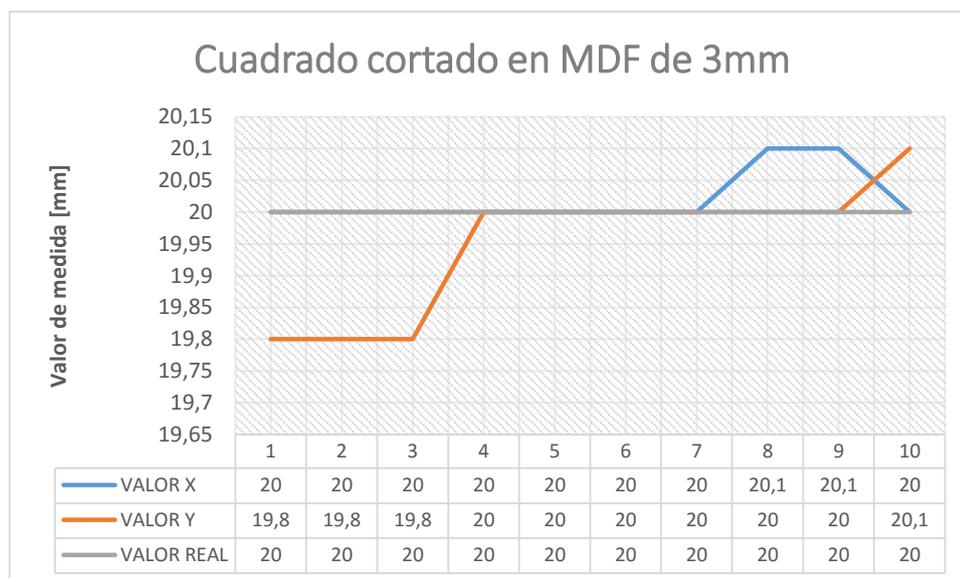


Figura 85. Medidas de un cuadrado cortado en MDF de 3 mm.

Como se puede apreciar en la figura 85, se tiene como límite inferior de error de 19.8 y límite superior de 20.1 obteniendo así la precisión de corte de 0,3 mm para un cuadrado en MDF con espesor de 3 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

b) Corte láser CO₂ en MDF de 4 mm de espesor.

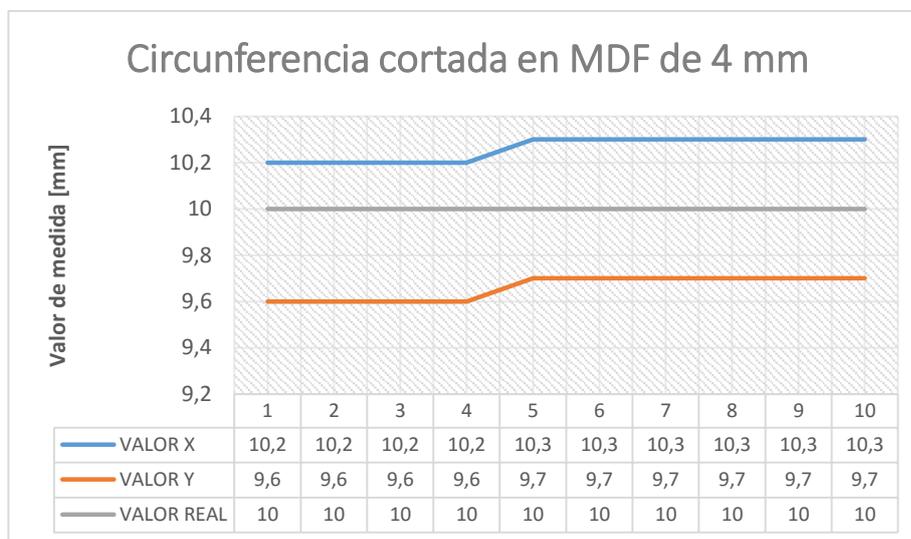


Figura 86. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 4 mm.

Como se puede apreciar en la figura 86, se tiene como límite inferior de error de 9,6 y límite superior de 10,3 obteniendo así la precisión de corte de 0,7 mm para una circunferencia en MDF con espesor de 4 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

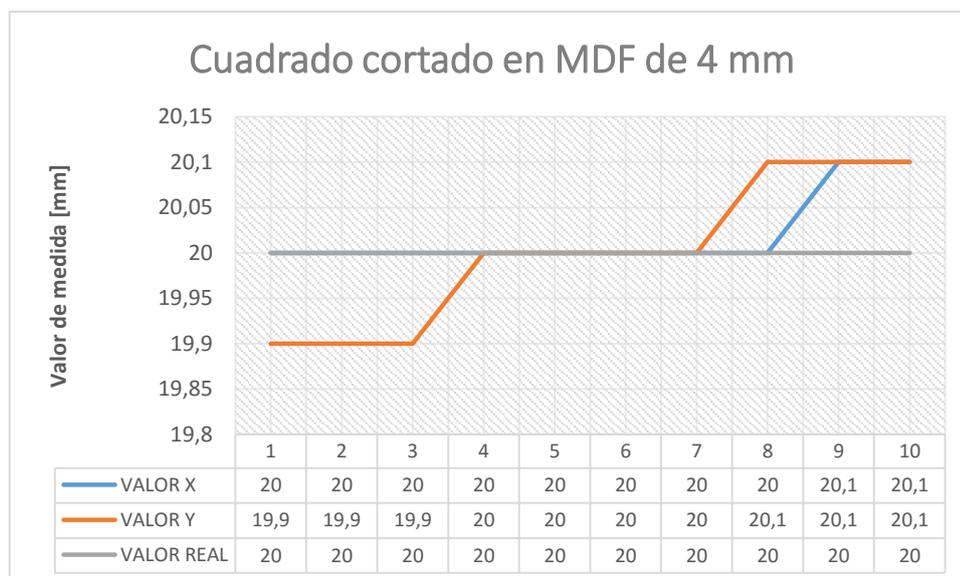


Figura 87. Medidas de un cuadrado cortado en MDF de 4 mm.

Como se puede apreciar en la figura 87, se tiene como límite inferior de error de 19,9 y límite superior de 20,1 obteniendo así la precisión de corte de 0,2 mm para un

cuadrado en MDF con espesor de 4 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

c) Corte láser CO₂ en MDF de 9 mm de espesor.

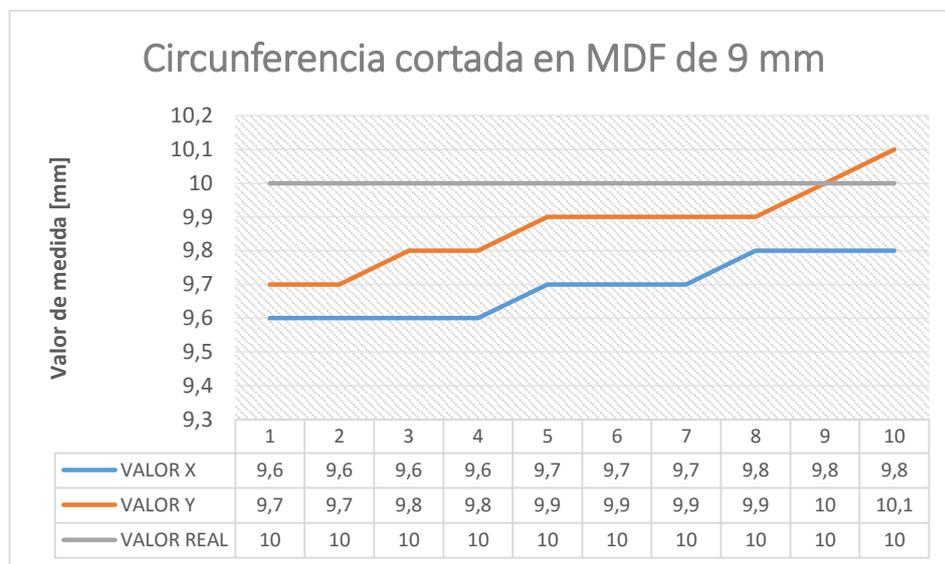


Figura 88. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 9 mm.

Como se puede apreciar en la figura 88, se tiene como límite inferior de error de 9.6 y límite superior de 10,1 obteniendo así la precisión de corte de 0,5 mm para una circunferencia en MDF con espesor de 9 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

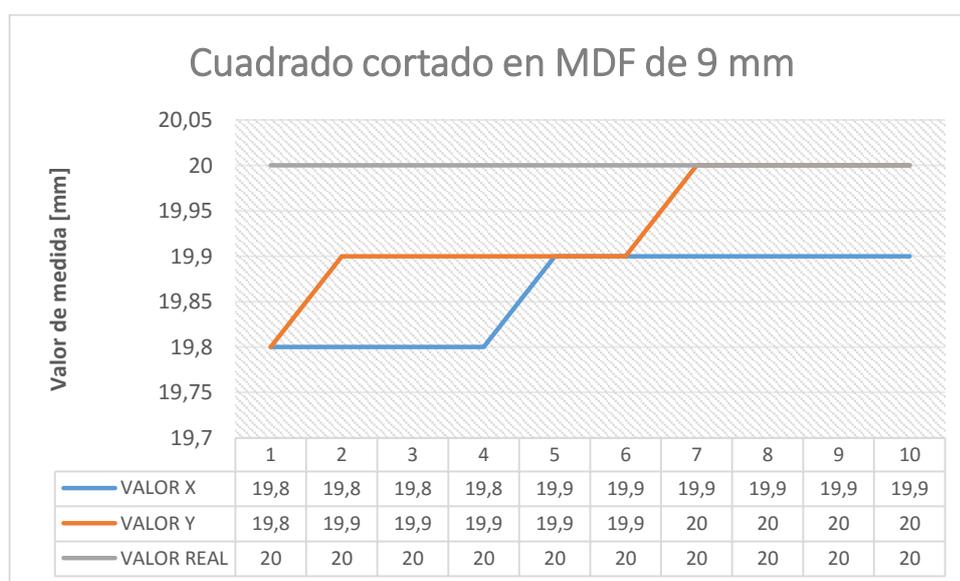


Figura 89. Medidas de cuadrado cortado en MDF de 9 mm.

Como se puede apreciar en la figura 89, se tiene como límite inferior de error de 19.8 y límite superior de 20 obteniendo así la precisión de corte de 0,2 mm para un cuadrado en MDF con espesor de 9 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

3.2. Corte con láser CO₂ en aglomerado.

a) Corte láser CO₂ en aglomerado de 4 mm de espesor.

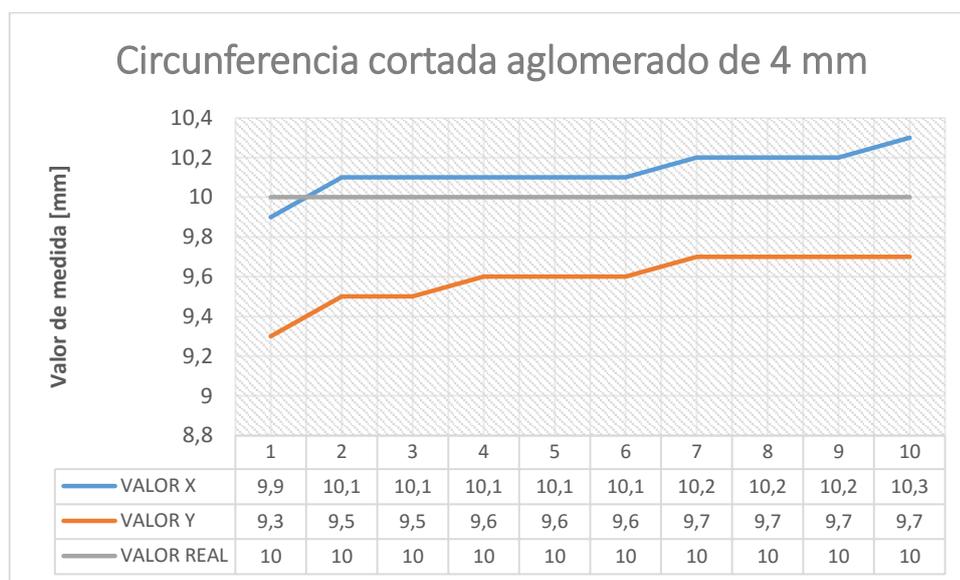


Figura 90. Medidas de circunferencia cortada en aglomerado de 4 mm.

Como se puede apreciar en la figura 90, se tiene como límite inferior de error de 9,3 y límite superior de 10,3 obteniendo así la precisión de corte de 10 mm para una circunferencia en aglomerado con espesor de 4 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

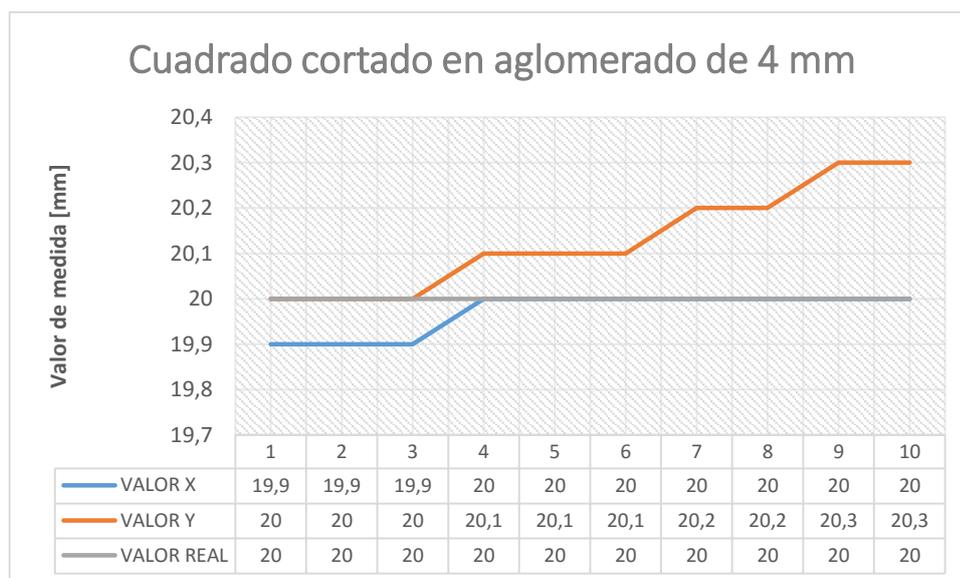


Figura 91. Medidas de un cuadrado cortado en aglomerado de 4 mm.

Como se puede apreciar en la figura 91, se tiene como límite inferior de error de 19.9 y límite superior de 20.3 obteniendo así la precisión de corte de 0,4 mm para un cuadrado en aglomerado con espesor de 4 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

b) Corte láser CO₂ en aglomerado de 9 mm de espesor

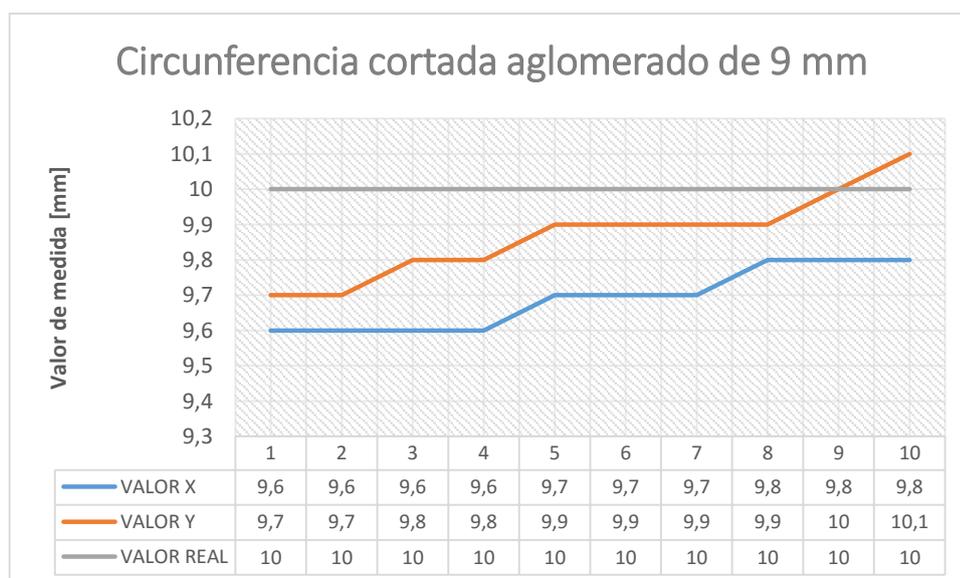


Figura 92. Medidas de circunferencia cortada en MDF de 3 mm.

Como se puede apreciar en la figura 92, se tiene como límite inferior de error de 9,6 y límite superior de 10,1 obteniendo así la precisión de corte de 0,5 mm para una circunferencia en aglomerado con espesor de 9 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

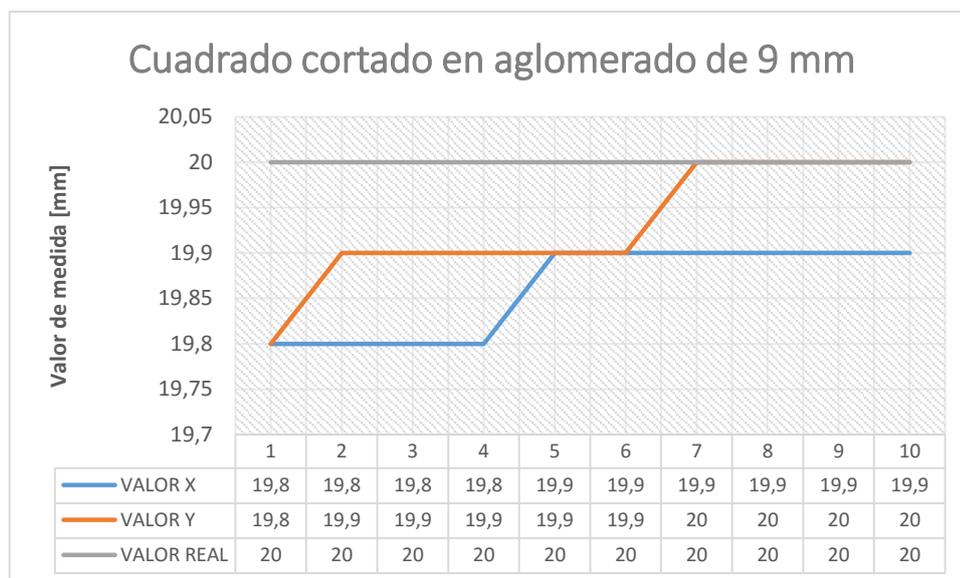


Figura 93. Medidas de un cuadrado cortado en aglomerado de 9 mm.

Como se puede apreciar en la figura 93, se tiene como límite inferior de error de 19.8 y límite superior de 20 obteniendo así la precisión de corte de 0,2 mm para un cuadrado en aglomerado con espesor de 9 mm. La precisión de corte se obtiene de la diferencia entre el límite superior e inferior.

3.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de datos de mediciones es una práctica común ya que permite obtener una determinación analítica de la incertidumbre del resultado final (ver punto 1.8), esto es, una vez hallados y acotados los errores sistemáticos puede obtenerse un valor que caracterice a los errores restantes (aleatorios o fortuitos). Cabe aclarar que el tratamiento estadístico de datos no puede eliminar tendencias fijas contenidas en las mediciones, como por ejemplo, la que puede derivar de un error sistemático.

Para realizar el análisis y aplicar los métodos estadísticos mencionados, es necesario contar con un gran número de mediciones, o sea contar con una población

de datos, y además los errores sistemáticos deben ser pequeños en comparación con los errores residuales (o aleatorios). (Ronconi, 2015)

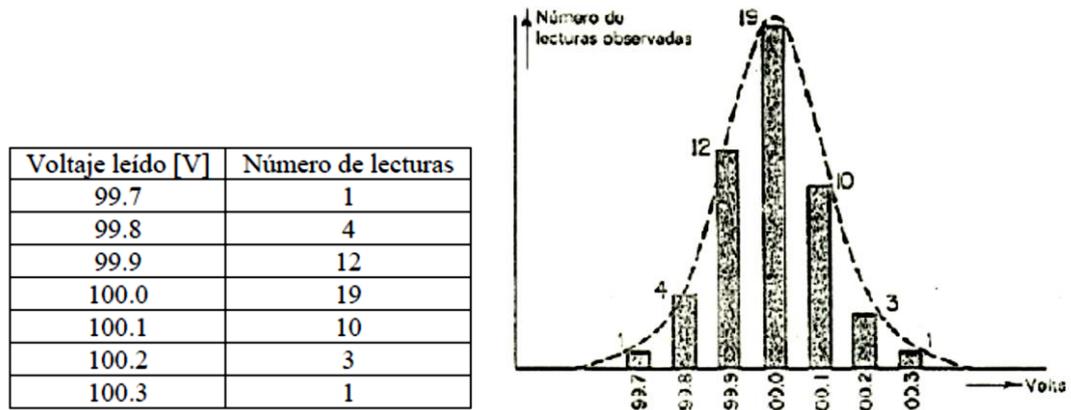


Figura 94. Ejemplo de distribución normal de mediciones de voltaje

Fuente: (Ronconi, 2015)

3.4. Distribución normal de errores.

Esta distribución, permite realizar una breve descripción de muchos resultados en mediciones que están afectadas de errores a través de una campana de Gauss. Las medidas repetidas y realizadas con gran cuidado siguen en muchos casos esta particular distribución.

El contorno de la misma es una curva con forma de campana llamada campana de Gauss.

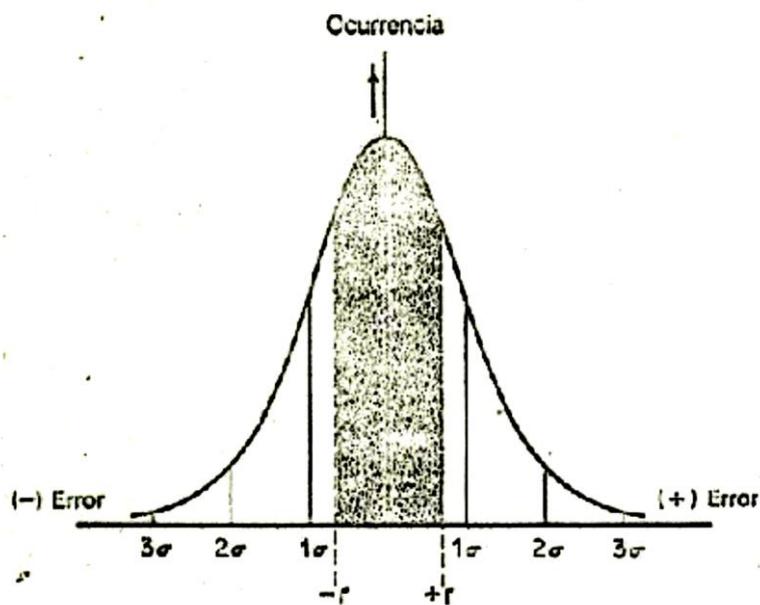


Figura 95. Distribución normal de errores

Fuente: (Ronconi, 2015)

Esta distribución normal o gaussiana de error es la base del estudio analítico de los efectos aleatorios.

- Todas las observaciones incluyen pequeños efectos de distorsión, llamados errores aleatorios.
- Los errores aleatorios pueden ser positivos o negativos.
- Hay igual probabilidad de errores aleatorios positivos o negativos.

El área total bajo la distribución normal entre los límites $-\infty$, y $+\infty$ representa el número entero de observaciones. Ahora el área sombreada entre $\pm\sigma$ incluye alrededor del 68% de todos los casos.

A través de los errores calculados de las mediciones realizadas en las tablas de corte para MDF y aglomerado de diferentes espesores, se realiza una distribución normal mediante una tabla común para cada tipo de madera expuesto.

a) *Corte con láser CO₂ en MDF.*

Tomando en cuenta los errores calculados previamente como datos para determinar su frecuencia y así su distribución normal se tiene que para el corte de una circunferencia en diferentes espesores, hay una media de 2,3 y desviación estándar de 1,15 para los errores calculados en el plano X, y para los errores calculados en el plano Y hay una media de 3,07 y desviación estándar de 1,17. De esta manera se obtiene la representación gráfica de la distribución normal de errores para el corte de una circunferencia en MDF con diferentes espesores en los planos X e Y.

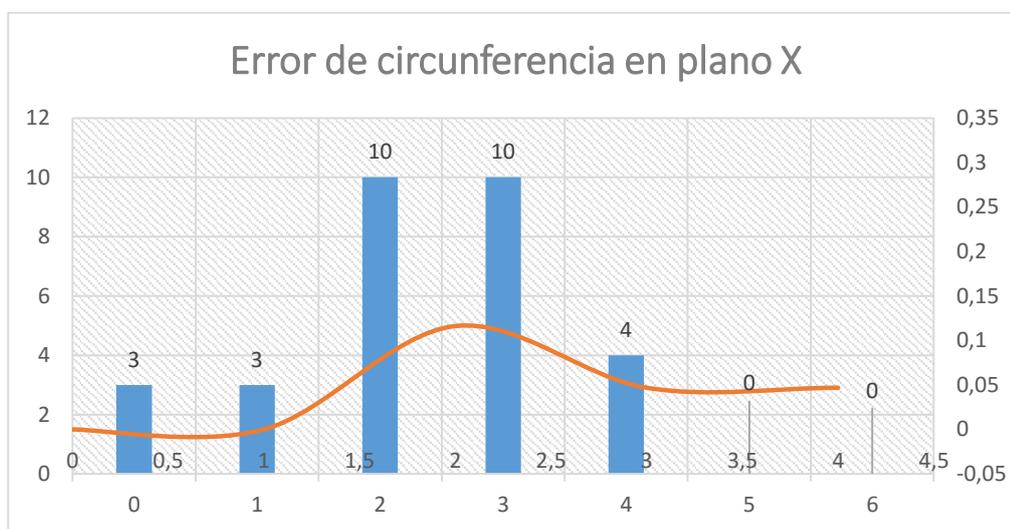


Figura 96. Distribución normal de errores de plano X en MDF.

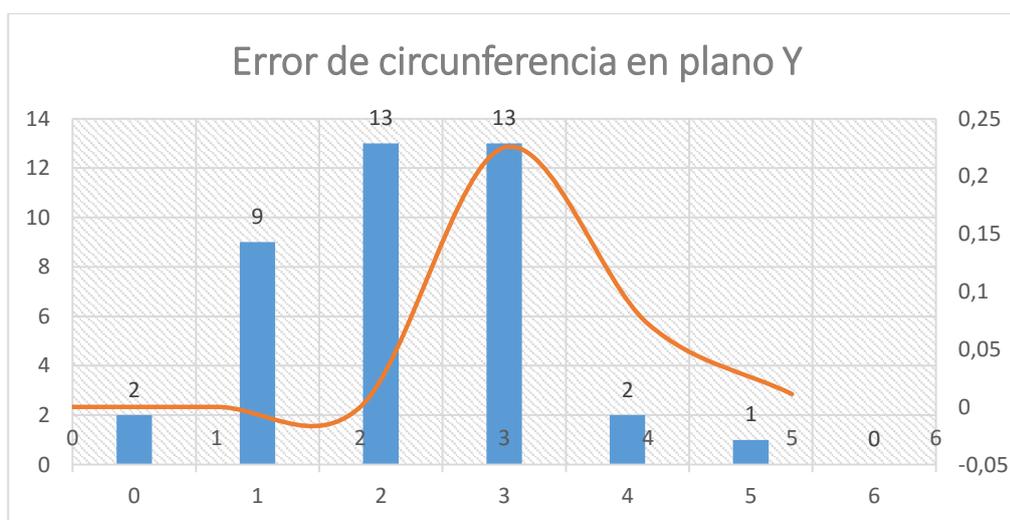


Figura 97. Distribución normal de errores de plano Y en MDF.

Como se observa en las figuras 96 y 97 cumplen con las medias calculadas tanto para el plano X como para el plano Y.

Debido a que los errores calculados en el corte de un cuadrado de MDF son insignificantes y no presentan variedad no se realiza un estudio completo a través de la distribución normal de errores.

b) Corte con láser CO₂ en aglomerado.

Tomando en cuenta los errores calculados previamente como datos para determinar su frecuencia y así su distribución normal se tiene que para el corte de una circunferencia en diferentes espesores, hay una media de 2,3 y desviación estándar de 1,13 para las errores calculados en el plano X, y para los errores calculados en el plano Y hay una media de 2,8 y desviación estándar de 1,74. De esta manera se obtiene la representación gráfica de la distribución normal de errores para el corte de una circunferencia en aglomerado con diferentes espesores en los planos X e Y.

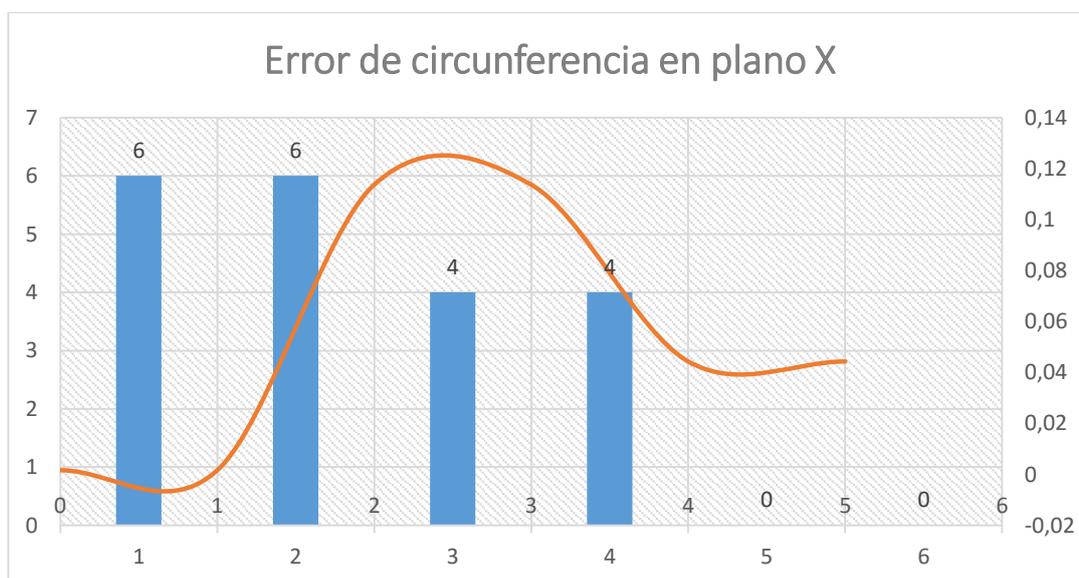


Figura 98. Distribución normal de errores de plano X en aglomerado.

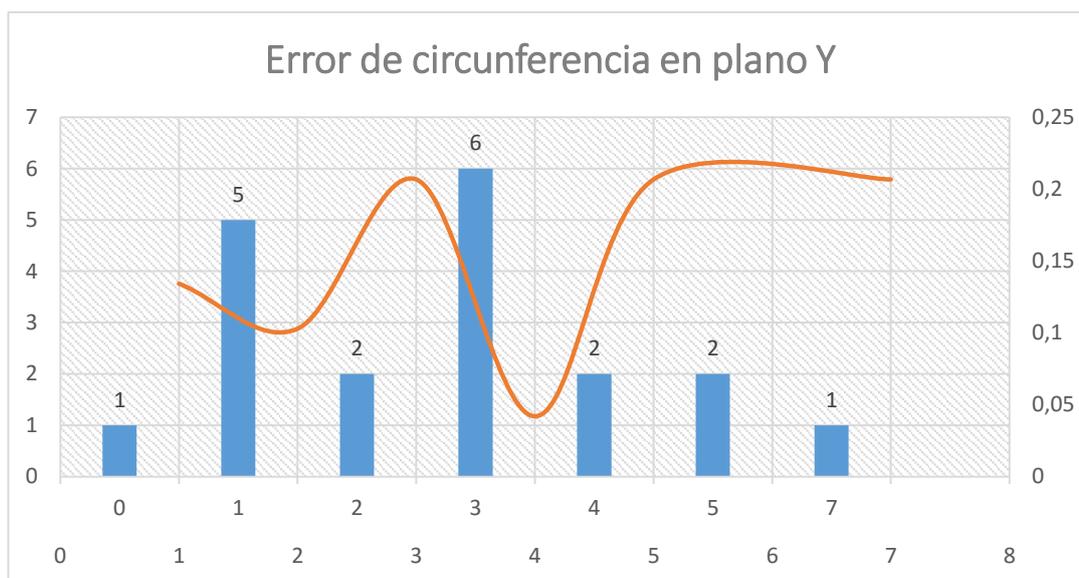


Figura 99. Distribución normal de errores de plano Y en aglomerado.

Como se observa en las figuras 98 y 99 cumplen con las medias calculadas tanto para el plano X como para el plano Y.

Debido a que los errores calculados en el corte de un cuadrado de aglomerado son insignificantes y no presentan variedad no se realiza un estudio completo a través de la distribución normal de errores.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conclusiones.

- El sistema construido puede realizar grabados y cortes en madera de espesor de hasta 8 mm mediante un sistema CAD/CAM capaz de ejecutar formas propuestos por el cliente de la empresa.
- La máquina construida en el presente proyecto es ergonómica y tiene un sistema de seguridad de paro de emergencia y seguridades al momento de abrir sus puertas, evitando así que el operario sufra algún accidente. También cuenta con un sistema de extracción de gases y vapor generados al momento del corte.
- El corte por láser CO₂ es una tecnología limpia, no contamina ni necesita el uso de químicos, ya que su generación de haz de láser depende de gases no contaminantes y una excitación eléctrica. Determinando así que el corte por láser CO₂ es un excelente medio de corte automatizado para evitar la contaminación del medio ambiente.
- Los cortes realizados en las planchas de madera son nítidos presentan un mínimo error y su acabado no presenta rebabas, tiene un color parduzco y corta un máximo de 9 mm de espesor de cualquier madera hasta un 95 % de la potencia del láser.
- La tarjeta DSP o Procesador Digital de Señales admite la manipulación de pulsos digitales PWM con lo cual se controla el movimiento del cabezal a cualquier punto del eje X e Y que el sistema robótico cartesiano lo permita dentro del área de trabajo que posea la máquina. Otra de las principales capacidades del DSP es de controlar la potencia del láser para el corte y grabado con mayor precisión y exactitud que con otros sistemas digitales como Arduino, Raspberry, Waspote, etc.

2. Recomendaciones.

- Para un futuro proyecto de titulación es viable la construcción de un sistema de refrigeración de láser para que pueda prolongar más la vida útil del mismo generando de esta manera un mejor rendimiento y eficiencia al momento de realizar el trabajo.
- Es conveniente como proyecto final la elaboración de un tubo láser CO₂, ya que por el desconocimiento de su aplicación en el país no existen empresas que los fabriquen, siendo así un incentivo para promover su producción.
- Para trabajos de corte en metal, se puede utilizar plasma, tomando en cuenta que su herramienta de corte es adaptable al sistema robotico cartesiano X-Y del presente proyecto, ya que para realizar cortes de metal se necesita de mayor potencia de un tubo láser CO₂ y esto representa una inversión considerablemente alta.

BIBLIOGRAFÍA

- AITIM. (1976). Corte industrial de la madera utilizando laser. *AITIM N°77*, 1-2.
- Aliexpress. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de <http://www.aliexpress.com/item-img/CW8060-Stepper-motor-driver-80VDC-6A-256-Microstep-for-CNC-Router-Mill-CNC-Stepper-Controller-kit/32480183649.html>
- Amarilys, A. (15 de Julio de 2015). *monografias.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos99/laser-importancia/laser-importancia.shtml#procesosda>
- Arpi, J., & Cabrera, D. (n.a. de Enero de 2013). *DSpace*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3351>
- Bachs, L., Cuesta, J., & Carles, N. (1988). *Aplicaciones industriales del laser*. Barcelona: A.G. Portavella.
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robòtica*. Madrid: Lavel S.A.
- Bermejo, R. (2007). *Corte y soldeo làser*. Madrid: CESOL.
- Castro, L. F. (2010). Corte y grabado laser: Tecnología novedosa versatil y sencilla. *El mueble y la madera*, 84-90.
- Chemalnero. (7 de Mayo de 2012). *Wikispaces*. Obtenido de <https://wiki2eso.wikispaces.com/La+madera+y+sus+derivados>
- Construpedia. (6 de Julio de 2015). *Construmática*. Obtenido de <http://www.construmatica.com/construpedia/Madera>
- Cuesta, A. (2011). *Tecnología laser: Aplicaciones industriales*. Barcelona: MARCOMBO.
- Direct Industry. (15 de Mayo de 2015). *Direct Industry*. Obtenido de http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/robot-cartesiano-3-ejes-manipulacion-preensamblado-12463-2321171.jpg
- EcoChillers Inc. (29 de Julio de 2015). *Ecochillers*. Obtenido de <http://www.ecochillers.com/Que-es-un-Chiller>
- EDEC. (13 de Octubre de 2015). *EDEC*. Obtenido de <http://www.edec.gob.ec/?q=content/innovacentro-de-la-madera-y-el-mueble>
- Edimca. (17 de Julio de 2015). *Edimca*. Obtenido de <http://www.edimca.com.ec/historia-edimca>
- Esténoz Valenzuela, J. (10 de Marzo de 2011). *Zaguan*. Obtenido de <http://zaguan.unizar.es/record/5646/files/TAZ-PFC-2011-098.pdf>
- GAES. (2015). *Informacion tecnica de guias lineales HIWIN*. San Sebastian: n.a.
- Garcia, S. (s.f de s.f de 1996). Reaccion al fuego. *AITIM N°182*, 76-81.

- Gómez, C. A., Daza, M. D., & Quintero, M. J. (s.f. de s.f. de 2012). *Slideshare*. Obtenido de http://es.slideshare.net/Karma_92/chiller-14706434
- Hernández, M., Ortiz, M. B., Calles, C. A., & Rodríguez, J. C. (2015). *Robotica: Análisis, modelado, control e implementacion*. Victoria: OmniaScience.
- Ignacio, R. (11 de Mayo de 2015). *IKKARO*. Obtenido de <http://www.ikkaro.com/como-hacer-fresadora-cnc-casera/>
- INA. (2007). *INA tecnica lineal*. Barcelona: n.a.
- Leadshine Technology. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de http://es.aliexpress.com/store/product/Leadshine-3ND583-3-phase-microstepping-Drive-work-36-50-VDC-out-2-1A-to-8-3A/202210_554512797.html?spm=2114.04020208.3.2.B8uAtL&ws_ab_test=201556_2,201527_3_71_72_73_74_75,201409_4.
- Leadshine Technology. (13 de Octubre de 2015). *Leadshine*. Obtenido de <http://www.leadshine.com/UploadFile/Down/573Sxx.pdf>
- Mesa, A. W. (3 de Julio de 2008). *monografias.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos61/laser-aplicaciones/laser-aplicaciones2.shtml>
- Miliarium Aureum. (8 de Julio de 2004). *Miliarium*. Obtenido de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
- NAER. (07 de Enero de 2016). *NAER*. Obtenido de <http://www.naer.es/catalogo/extractor-simpledoble>
- Peraza, C. (1976). La degradacion de la madera. *AITIM N°81*, 11-22.
- Power laser seller store. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de http://es.aliexpress.com/store/product/Free-DHL-Shipping-2015-Upgrading-100W-CO2-Laser-Tube-RECI-S4-10000-Hours-Power-Supply-LCD/410790_32390844895.html?spm=2114.04020208.3.2.Dgoamx&ws_ab_test=201526_2,201527_3_71_72_73_74_75,201409_4.
- Product overview. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de http://es.aliexpress.com/store/product/100W-Laser-Engraving-Equipment-RECI-Power-Supply-DY13/302121_32372466741.html?spm=2114.04020208.3.19.Lkky6F&ws_ab_test=201526_2,201527_3_71_72_73_74_75,201409_4.
- QuimiNet. (01 de Julio de 2011). *Quiminet*. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/el-funcionamiento-de-una-bomba-de-vacio-y-sus-caracteristicas-62213.htm>
- R.D.X. (6 de Abril de 2008). *Todopetardos.com*. Obtenido de <http://www.todopetardos.com/foro/index.php?topic=2248.0>

- Rabbit laser. (13 de Octubre de 2015). *Rabbit laser USA*. Obtenido de <http://www.rabbitlaserusa.com/WebShop/Chillers.html>
- Rastrojo. (15 de Julio de 2015). *Wikipedia*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos99/laser-importancia/laser-importancia.shtml#procesosda>
- Rattm motor cnc. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de <http://es.aliexpress.com/item/2-Axis-Nema-34-116MM-50A-1230oz-in-Stepper-Motor-Driver-6A-80VDC-256-Microstep/618709380.html>
- Rioja, C., Allepus, C., & Rioja, L. (s.f). *Làser*. Zaragoza: s.e.
- Rodríguez, H. (16 de Septiembre de 2015). *Ingemecánica*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html#introduccion>
- Ronconi, A. (21 de Noviembre de 2015). *Universidad Nacional de Quilmes*. Obtenido de [file:///C:/Users/Juan/Downloads/cnc/MedicionyError\(03\).pdf](file:///C:/Users/Juan/Downloads/cnc/MedicionyError(03).pdf)
- SAIN. (2015). *Ficha técnica de guías lineales de recirculación de bolas SAIN*. n.a.: n.a.
- Schneider Electric. (11 de Diciembre de 2008). *iseonline*. Obtenido de http://www.equiposdidacticos.com/img/desarrollos/MESAXY_WEB.pdf
- Scott, D. (8 de Junio de 2015). *eHow*. Obtenido de http://www.ehowenespanol.com/funcionan-laseres-co2-como_166669/
- Shenzen. (15 de Mayo de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de <http://es.aliexpress.com/item/Tms320f28335-dsp-development-board-mdash-plate-dsp-artificial-device/1125697482.html>
- Shenzhen Penghui technology. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de http://es.aliexpress.com/store/group/Nema-43/1813327_501929409.html
- Shuzou master laser technology. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de http://es.aliexpress.com/store/product/best-quality-gas-nozzle-for-CO2-laser-cutting-machine-laser-head/1293176_1892334787.html
- Sign in china. (13 de Octubre de 2015). *Aliexpress*. Obtenido de <http://www.sign-in-china.com/data/productcate/600x600/2012-11-29/RECI-CO2-Laser-Tube-120W-W4-Water-Cooling-for-the-Laser-Engraver-6090.jpg>
- Steen, W. (1991). *Laser material processing*. Londres: Springer-Verlag.
- teknoartes. (15 de Octubre de 2015). *teknoartes*. Obtenido de <http://www.teknoartes.com/index.php/productos>
- Trotec. (15 de Julio de 2015). *trotec laser*. Obtenido de www.troteclaser.com/es-ES-MX/Materiales/Pages/Madera.aspx
- UCML. (13 de Octubre de 2015). *UCML*. Obtenido de <https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema05.pdf>

Universal laser systems. (15 de Octubre de 2015). *ulsinc*. Obtenido de <http://www.ulsinc.com/es-es/markets/>

Wikipedia. (23 de Septiembre de 2014). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_de_coordenadas_cartesianas

Wolfgang, N. (2000). *Tecnología de la madera y del mueble*. Barcelona: REVERTÉ.

ANEXOS