



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC
PARA EL CORTE Y GRABADO EN MADERA UTILIZANDO
LÁSER DE CO₂, IMPLEMENTADO CON HARDWARE Y
SOFTWARE DE USO LIBRE COMO SISTEMA DE CONTROL**

AUTORES:

ANA PAMELA CASTRO MARTIN

DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA

DIRECTOR: ING. HÉCTOR TERÁN

CODIRECTOR: ING. WILSON TRÁVEZ

LATACUNGA

2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA****CERTIFICACIÓN****ING. HÉCTOR TERÁN (CODIRECTOR)****ING. WILSON TRÁVEZ (DIRECTOR)****CERTIFICAN:**

El proyecto de grado denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA EL CORTE Y GRABADO EN MADERA UTILIZANDO LÁSER DE CO2, IMPLEMENTADO CON HARDWARE Y SOFTWARE DE USO LIBRE COMO SISTEMA DE CONTROL”**, realizado por: ANA PAMELA CASTRO MARTIN y DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA ha sido guiado y revisado periódicamente cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Debido a que constituye un trabajo con excelente contenido científico que ayudará a la aplicación de conocimientos y desarrollo profesional, SI recomiendan su publicación.

Latacunga, 4 de mayo del 2015

Ing. Héctor Terán
DIRECTOR

Ing. Wilson Trávez
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS - ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros,

ANA PAMELA CASTRO MARTIN

DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA EL CORTE Y GRABADO EN MADERA UTILIZANDO LÁSER DE CO2, IMPLEMENTADO CON HARDWARE Y SOFTWARE DE USO LIBRE COMO SISTEMA DE CONTROL”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan manteniendo normas APA, y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, 4 de mayo del 2015

Ana Pamela Castro Martin

C.C.: 1804560744

Darío Fernando Guamán Lozada

C.C.: 0603520172

UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS - ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros,

ANA PAMELA CASTRO MARTIN

DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual el trabajo proyecto de grado denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA EL CORTE Y GRABADO EN MADERA UTILIZANDO LÁSER DE CO2, IMPLEMENTADO CON HARDWARE Y SOFTWARE DE USO LIBRE COMO SISTEMA DE CONTROL”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, 4 de mayo del 2015

Ana Pamela Castro Martin

C.C.: 1804560744

Darío Fernando Guamán Lozada

C.C.: 0603520172

DEDICATORIA

A mi Dios, mi Padre Celestial por su amor y fortaleza a lo largo de mi vida siendo mi refugio y mi amparo permitiéndome lograr mis objetivos.

A mi papá Julio por su esfuerzo y apoyo siendo mi inspiración y ejemplo para seguir adelante.

A mi mamá Anita por mostrar su fortaleza a pesar de las circunstancias, por permanecer a mi lado dándome consejos y respaldo.

A mis hermanos Vero y Julio por su compañía en las noches oscuras y días brillantes, por las sonrisas y por ser mis mejores amigos. Los quiero.

Ana Pamela Castro Martin

A mis Padres Hugo y Adriana, que gracias con su ejemplo y apoyo he logrado culminar esta etapa de preparación profesional.

A mis Hermanos María Dolores, Cody y Dayana quienes me motivan para alcanzar mis metas.

Darío Fernando Guamán Lozada

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarnos por un camino iluminado de enseñanza y alegría, permitiéndonos compartir momentos con las personas que amamos.

A nuestros padres y hermanos, quien ha sido y serán el eje fundamental de nuestro desarrollo brindándonos cada día apoyo, confianza y amor.

A nuestro tutor, codirector y a cada uno de los docentes por compartirnos su conocimiento encaminado a formar profesionales de excelencia.

A nuestra familia, amigos, compañeros y personas que de una u otra forma han contribuido para que nuestras metas se cumplan.

Pamela y Darío

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES	XVII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT	XIX
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO	1
2.1 Máquinas CNC	1
2.1.1 Esquema general	1
2.1.2 Características de las máquinas CNC	1
2.1.3 ¿Cuándo es necesario el uso de una máquina CNC?	2
2.1.4 Diferencia entre una máquina convencional vs máquina CNC.	3
2.1.5 Grados de libertad.	3
2.1.6 Sistemas de transmisión.	5
2.1.7 Actuadores.	8
2.2 Láser de CO ₂	12
2.2.1 Generación del haz láser.	12
2.2.2 Categorías de láser CO ₂	13

2.2.3	Parámetros del haz láser.....	16
2.2.4	Distancias focales de lentes para láser CO2.....	17
2.3	Software y hardware libre	20
2.3.1	Hardware libre.....	20
2.3.2	Sistemas embebidos	21
2.3.3	Software libre	25
2.4	Corte y grabado de madera.....	29
2.4.1	Madera	29
2.4.2	Procesos de grabado.....	36
2.4.3	Ventajas de una máquina CNC para corte y grabado con láser CO2... 39	
2.4.4	Tipos de madera adecuados para el grabado y corte con láser.	40
2.4.5	Aplicaciones de corte y grabado con láser CO2	40
CAPÍTULO II		42
DISEÑO		42
4.1	Introducción.....	42
4.2	Diseño mecánico	42
4.2.1	Eje X.	43
4.2.2	Eje Y.	54
4.2.3	Diseño general del sistema de movimiento.....	59
4.2.4	Torque requerido en los motores.....	62
4.3	Diseño eléctrico – electrónico	74
4.3.1	Diseño eléctrico.....	74
4.3.2	Diseño electrónico.....	78
4.4	Hardware y software libre	87
4.4.1	BegleBoneBlack (BBB).....	87

4.4.2	Arduino Uno	93
CAPÍTULO III.....		95
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....		95
6.1	Implementación del sistema mecánico.....	95
6.1.1	Cabezal láser	95
6.1.2	Sistema de desplazamiento del eje Y	96
6.1.3	Sistema de desplazamiento del eje X.....	98
6.1.4	Implementación de la transmisión láser.....	101
6.1.5	Sistema de refrigeración.....	106
6.1.6	Sistema de absorción de humo.....	106
6.1.7	Estructura y carcasa.....	107
6.2	Implementación del sistema de control	108
6.2.1	Placa electrónica.....	108
6.2.2	Tablero Eléctrico/ Electrónico	109
6.2.3	Conexiones externas del tablero.....	111
6.3	Software – LasaurApp.....	114
6.3.1	Cargar imagen Lasersaur.....	114
6.3.2	Configuración Wi-Fi	115
6.3.3	Implementación grbl láser.....	118
CAPÍTULO IV		120
PRUEBAS Y RESULTADOS		120
8.1	Pruebas del sistema mecánico.	120
8.1.1	Prueba de perpendicularidad.....	120
8.1.2	Prueba de velocidad	122

	X
8.1.3 Prueba de precisión	124
8.1.4 Prueba de posicionamiento	127
8.1.5 Prueba de profundidad de corte en madera.....	128
8.2 Pruebas del hardware y software libre.....	129
8.2.1 Pruebas de corte	129
8.2.2 Pruebas de grabado vectorizado.....	131
CAPÍTULO IV	133
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
11.1 Conclusiones.	133
11.2 Recomendaciones.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	136
NETGRAFÍA.....	136
ANEXOS	140
ANEXO A. Manual de usuario	
ANEXO B. Análisis financiero	
ANEXO C. Proceso de funcionamiento	
ANEXO D. Configuración BBB	
ANEXO E. Planos mecánicos	
ANEXO F. Rueda eje X	
ANEXO G. Propiedades AISI 1018	
ANEXO H. Resistencia de materiales	
ANEXO I. Esquema electrónico	
ANEXO J. Drivers Leadshine	
ANEXO K. Motores Leadshine	

ANEXO L. Capacidad de los conductores

ANEXO M. Software

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 Sistema de control numérico.	1
Figura 1.2 SELL CNC LÁSER CO2 B-1290	1
Figura 1.3 Tres grados de libertad.	4
Figura 1.4 Husillo de bolas	5
Figura 1.5 Piñón y cremallera.	6
Figura 1.6 Correas y poleas dentadas.	7
Figura 1.7 Disposición de las bobinas de un motor bipolar de dos fases.	9
Figura 1.8 Motor a pasos, excitado por una bobina en posición de equilibrio a 0°..	10
Figura 1.9 Motor a pasos, rotado a un paso de la posición de equilibrio a 0 °.	10
Figura 1.10 Motor paso a paso excitado por dos bobinas en forma simultánea	11
Figura 1.11 Cambio de nivel energético de las moléculas de CO2.	12
Figura 1.12 Amplificador óptico.....	13
Figura 1.13 Diagrama esquemático de un láser de CO2 de flujo axial lento.....	14
Figura 1.14 Tubo de láser de CO2 sellado.....	15
Figura 1.15 Diagrama esquemático de un láser de guía de onda de CO2.....	15
Figura 1.16 Longitud de Onda de un láser de CO2.	17
Figura 1.17 Plano convexo.	18
Figura 1.18 Distancia focal.	18
Figura 1.19 Distancia focal corta para diferentes espesores.	19
Figura 1.20 Distancia focal larga para diferentes espesores.	19
Figura 1.21 LasaurApp.	28
Figura 1.22 Movimientos de la herramienta de corte.	31
Figura 1.23 Ejes ortotrópicos.	32
Figura 1.24 Cortador láser.	33
Figura 1.25 K. Kollwitz: La sombra. 1924 (Xilografía).	37
Figura 1.26 A. Durero: Melancolía I. 1514. (Grabado a buril).	38

Figura 1.27 Grabado por vectores sobre madera.	39
Figura 1.28 Grabado en madera.	40
Figura 1.29 Corte de piezas decorativas en madera.	41
Figura 1.30 Rótulo en relieve en derivado de madera (MDF).	41

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Esquema general.	43
Figura 2.2 Partes cabezal láser.	43
Figura 2.3 Cabezal Láser.	43
Figura 2.4 Cabezal Láser.	44
Figura 2.5 Cabezal láser telescópico.	44
Figura 2.6 guía lineal eje X.	45
Figura 2.7 Ruedas carro X.	45
Figura 2.8 Ensamble Ruedas-Guía Lineal.	46
Figura 2.9 Rodamientos RM2-2RS 1013.	46
Figura 2.10 Grado de libertad en el carro del eje X.	47
Figura 2.11 Geometría base del carro del EjeX.	48
Figura 2.12 Vista Frontal, posterior y lateral del ensamble del carro X.	48
Figura 2.13 Ensamble carro-guía del eje X.	49
Figura 2.14 Esquema viga simplemente apoyada.	50
Figura 2.15 Fuerza cortante máxima [N] (a) Momento flector máximo [Nm] (b). ..	51
Figura 2.16 Esquema perfil guía del carro X.	51
Figura 2.17 Factor de seguridad mínimo (≥ 3)	53
Figura 2.18 Desplazamiento Máximo ($\leq 0.3\text{mm}$)	53
Figura 2.19 Soportes laterales Eje X.	54
Figura 2.20 Rodamientos (1) Eje (2).	54
Figura 2.21 Esquema del eje para guía en Y.	55
Figura 2.22 Fuerza cortante máxima [N] (a) Momento flector máximo [Nm] (b). ..	56
Figura 2.23 Esquema perfil guía del eje Y.	56
Figura 2.24 Factor de seguridad mínimo (≥ 21)	58
Figura 2.25 Desplazamiento Máximo ($\leq 0.2\text{mm}$)	58
Figura 2.26 Soporte lateral eje X (Motor).	59

Figura 2.27	Soporte lateral eje X (Espejo, polea tensora).	59
Figura 2.28	Soporte trasero Y (Motor-Eje).	60
Figura 2.29	Soporte trasero Y (Chumacera-Eje.)	60
Figura 2.30	Ensamble del Eje X.	60
Figura 2.31	Ensamble del Eje Y.	61
Figura 2.32	Ensamble total del sistema de movimiento.	61
Figura 2.33	Diagrama de movimiento para el eje X.	62
Figura 2.34	Diagrama movimiento para el eje Y.	64
Figura 2.35	Bosquejo general eje de transmisión.	66
Figura 2.36	Diagrama configuración motor-eje.	66
Figura 2.37	Componentes X y Z de la Fuerza FP2.	67
Figura 2.38	DCL Plano XZ.	68
Figura 2.39	DCL Plano YZ.	69
Figura 2.40	Esfuerzo cortante(a) y momento flector(b) en el plano XY.	70
Figura 2.41	Esfuerzo cortante(c), momento flector(d) en el plano XY, y momento total (e).	70
Figura 2.42	Esquema eléctrico sistema de refrigeración.	76
Figura 2.43	Esquema eléctrico del tubo láser.	76
Figura 2.44	Esquema eléctrico motores a pasos.	77
Figura 2.45	Configuración de pines Atmega 328p-PU.	79
Figura 2.46.-	Esquema del circuito de protección.	79
Figura 2.47	Conexión del SSR.	80
Figura 2.48	Conexión de los controladores de motores a paso.	81
Figura 2.49	Circuito para aire asistente.	82
Figura 2.50	Terminales de control de la fuente de láser.	83
Figura 2.51	Circuito para el control de la fuente láser.	84
Figura 2.52	Resistencia PULL-DOWN.	84
Figura 2.53	Circuito de deshabilitación del láser de CO2.	85
Figura 2.54	Comunicación entre la BBB y el ATmega 328p-PU.	86
Figura 2.55	Tarjeta BBB montada directamente.	87
Figura 2.56	Interfaz LasersaurApp Modificada.	90
Figura 2.57	Menú Sobre.	90

Figura 2.58 Menú Administrador.	91
Figura 2.59 Herramienta Trabajos.	91
Figura 2.60 Herramienta Importar Archivo.	92
Figura 2.61 Herramienta Mover.	92
Figura 2.62 Herramienta Mensajes.	93
Figura 2.63 Botones de Estado.	93

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Montaje del cabezal láser	95
Figura 3.2 Partes del cabezal láser	96
Figura 3.3 Montaje eje Y	96
Figura 3.4 Montaje eje Y	97
Figura 3.5 Montaje eje Y	97
Figura 3.6 Montaje eje Y	98
Figura 3.7 Partes de polea y templador	98
Figura 3.8 Perfil eje X.....	99
Figura 3.9 Montaje del Eje X.....	99
Figura 3.10 Montaje del Eje X.....	100
Figura 3.11 Montaje Eje X.....	100
Figura 3.12 Montaje Eje X.....	100
Figura 3.13 Montaje del sujetador láser.....	101
Figura 3.14 Ángulo del haz reflejado por el espejo.	102
Figura 3.15 Montaje soporte espejo eje Y	102
Figura 3.16 Montaje soporte espejo eje X	102
Figura 3.17 Montaje soporte espejo cabezal láser.	103
Figura 3.18 Ensamble del soporte del espejo.....	104
Figura 3.19 Partes de los soportes de espejos	104
Figura 3.20 Montaje boquilla láser	105
Figura 3.21 Montaje boquilla láser	105
Figura 3.22 Montaje del sistema de refrigeración.....	106
Figura 3.23 Montaje del sistema de absorción de humo.....	107
Figura 3.24 Estructura y carcasa	108

Figura 3.25 Implementación de la placa electrónica.....	109
Figura 3.26 Implementación del tablero eléctrico/electrónico.....	109
Figura 3.27 Finales de carrera.....	112
Figura 3.28 Implementación paro de emergencia.....	113
Figura 3.29 Montaje del sistema de enfriamiento.....	113
Figura 3.30 Montaje del asistente de aire	114
Figura 3.31 Terminal Linux para cargar imagen de lasersaur.	115
Figura 3.32 Copia de imagen lasersaur.....	115
Figura 3.33 Putty SSH	116
Figura 3.34 Ingreso a la terminal de la tarjeta Beagle Bone	116
Figura 3.35 Redes disponibles en la Beagle Bone Black.....	117
Figura 3.36 Configuración red Wi-Fi	118
Figura 3.37 Verificación de conexión a internet de la BeagleBone Black	118
Figura 3.38 XLoader- Carga del grbl láser	119

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Triangulo de Prueba.	120
Figura 4.2 Cortes para pruebas de perpendicularidad.....	121
Figura 4.3 Campana de Gauss-Prueba de perpendicularidad.	122
Figura 4.4 Campana de Gauss-Prueba de Velocidad.....	124
Figura 4.5 Pieza de prueba.	124
Figura 4.6 Cortes de pruebas de precisión.	125
Figura 4.7 Campana de Gauss-Prueba de precisión eje “X”.....	126
Figura 4.8 Campana de Gauss-Prueba de precisión eje “Y”.....	127
Figura 4.9 Diseño previo en Inkscape para corte.....	129
Figura 4.10 Cortes enviados desde LasaurApp.....	130
Figura 4.11 Conicidad de corte	130
Figura 4.12 Diseño previo en Inkscape para grabado.....	131
Figura 4.13 Cortes de grabado vectorizado.	131

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Máquina Convencional vs Máquina CNC.	3
Tabla 1.2 Tecnología de servomotores vs motores a pasos	8
Tabla 1.3 Torque incremental por Micropaso.....	12
Tabla 1.4 Comparación plataformas embebidas más sobresalientes.	23
Tabla 1.5 Pruebas realizadas con máquina Lasersaur.	35

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Parámetros de la máquina.	42
Tabla 2.2 Condiciones de diseño para el eje X.	62
Tabla 2.3 Condiciones de diseño para el eje Y.	64
Tabla 2.4 Micro pasos comunes en diferentes Drivers.	73
Tabla 2.5 Especificaciones Actuadores.....	74
Tabla 2.6 Parámetros eléctricos de la máquina.	74
Tabla 2.7 Características Relé de Estado Sólido SSR-40DA	81
Tabla 2.8 Estados del circuito de seguridad.....	86

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Configuración de switch para corriente	110
Tabla 3.2 Configuración para corriente de reposo	111
Tabla 3.3 Configuración para corriente de reposo	111

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Valores obtenidos en la prueba de perpendicular.	121
Tabla 4.2 Datos obtenidos en la prueba de velocidad.	123
Tabla 4.3 Datos tomados en la prueba de precisión.	125
Tabla 4.4 Datos obtenidos en prueba de posicionamiento.	127
Tabla 4.5 Profundidades de corte.....	128

ÍNDICE DE ECUACIONES**CAPÍTULO II**

Ecuación 2.1 Tercera ley de newton.	46
Ecuación 2.2 Equilibrio (Momento)	46
Ecuación 2.3 Equilibrio (Fuerzas).....	49
Ecuación 2.4 Reacciones en los apoyos del eje X.....	50
Ecuación 2.5 Momentos en el punto A del eje X.....	50
Ecuación 2.6 Teoría esfuerzo normal máximo.....	52
Ecuación 2.7 Esfuerzo flector.	52
Ecuación 2.8 Deflexión en vigas con carga en la mitad.....	52
Ecuación 2.10 Inercia de una Circunferencia.....	56
Ecuación 2.11 Factor de Superficie Ka.....	71
Ecuación 2.12 Criterio de ED-Goodman.....	72

RESUMEN

En el presente documento se detalla el proceso de diseño, construcción e implementación de una máquina CNC para corte y grabado en madera, el sistema de control se implementó utilizando hardware y software de uso libre, gracias a diversas ventajas que ofrece frente al software propietario, siendo entre las más importantes el bajo costo y la fácil modificación del código fuente; logrando de esta manera una máquina personalizada y de fácil acceso para pequeñas empresas. Esta máquina consta de un sistema mecánico tipo cartesiano con movimiento bidimensional; el corte y grabado es posible gracias al haz de luz generado por el tubo láser de CO₂ que proyectado mediante espejos llegan hasta un lente que focaliza el haz en un solo punto, ocasionando el incremento de la temperatura y la incineración del material, el diseño de las partes más importantes de la máquina se realizó con la ayuda del software SolidWorks, comprobando el correcto funcionamiento y asegurando los cálculos realizados, evitando de esta manera restricciones antes de comenzar con la construcción. Para el diseño eléctrico-electrónico se consideró elementos que en su mayoría se pueden encontrar en el mercado local; el circuito electrónico cuenta con una tarjeta “Beaglebone Black”, en esta se cargará y modificará LasaurApp de acuerdo a los requerimientos de nuestra máquina, respetando los derechos del autor bajo licencia GNU Linux. En el capítulo de pruebas se constata el diseño obteniendo errores de precisión, velocidad y posicionamiento.

PALABRAS CLAVES:

- **HARDWARE LIBRE**
- **SOFTWARE LIBRE**
- **SISTEMAS DE CONTROL**
- **TARJETA BEAGLEBONE BLACK**
- **MÁQUINAS CNC**

ABSTRACT

This document shows the process of design, construction and implementation of a CNC machine for cutting and engraving on wood, the control system was implemented using hardware and software of free distribution, thanks to several advantages compared to proprietary software, being between most important low cost and easy modification of the source code; thus achieving a personalized machine and easily accessible to small businesses. This machine consists of a Cartesian system bidimensional mechanical movement; The cutting and engraving is possible thanks to the light beam generated by the laser tube CO₂ than projected by mirrors becomes able to pass through a lens that focuses the beam at a single point, causing the temperature increase and incineration of material, the design of the most important parts of the machine is made with the help of SolidWorks software, checking the correct operation and ensuring calculations also avoiding restrictions before starting construction; For the design Electric-Electronic took into account factors that mostly can be found in the local market, the electronic circuit has a "Beagle bone black" card in this is to upload and modify LasaurApp according to the requirements of our machine respecting the rights of the author under GNU Linux. In chapter tests, verifies the design and errors of accuracy, speed and positioning is shown.

KEYWORDS:

- **FREE HARDWARE**
- **FREE SOFTWARE**
- **CONTROL SYSTEM**
- **BEAGLEBONE BLACK CARD**
- **CNC MACHINES**

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

2.1 Máquinas CNC

“La diferencia entre una máquina herramienta convencional y una de Control Numérico Computarizado (CNC), es que está constituida fundamentalmente por sistemas de movimiento automático, y sistemas electrónicos, que procesan y controlan los movimientos; además de un software” (Mikell, 1997) que permite la comunicación del usuario con la máquina propiamente dicho.

2.1.1 Esquema general

“La arquitectura general que conforma una máquina CNC” (Ospina & Diaz, 2005), se puede observar en la figura 1.1.



Figura 1.1 Sistema de control numérico.

2.1.2 Características de las máquinas CNC



Figura 1.2 SELL CNC LÁSER CO2 B-1290

Fuente: (CNC Machines, 2009)

Las CNC poseen las siguientes ventajas:

- Mayor precisión y mejor calidad de productos.

- Mayor uniformidad en los productos producidos.
- Un operario puede operar varias máquinas a la vez.
- Fácil procesamiento de productos de apariencia complicada.
- Flexibilidad para el cambio en el diseño y en modelos en un tiempo cortó.
- Fácil control de calidad.
- Reducción en costos de inventario, traslado y de fabricación en los modelos y abrazaderas.
- No se requieren operadores con experiencia.
- Se reduce la fatiga del operador.
- Mayor seguridad en las labores.
- Aumento del tiempo de trabajo en corte por maquinaria.
- Fácil control de acuerdo con el programa de producción lo cual facilita la competencia en el mercado.
- Fácil administración de la producción e inventario lo cual permite la determinación de objetivos o políticas de la empresa.
- Permite simular el proceso de corte a fin de verificar que este sea correcto.

Sin embargo no todo es ventajas y entre las desventajas se puede citar:

- Alto costo de la maquinaria.
- Es necesario programar en forma correcta la selección de las herramientas de corte y la secuencia de operación para un eficiente funcionamiento.
- Los costos de mantenimiento aumentan, debido a que el sistema de control es más complicado y surge la necesidad de entrenar al personal de servicio y operación.
- Es necesario mantener un gran volumen de producción a fin de lograr una mayor eficiencia de la capacidad instalada (Ruiz, 2004).

2.1.3 ¿Cuándo es necesario el uso de una máquina CNC?

En términos de producción se logra establecer la alternativa de usar o no máquinas C.N.C.

- Cuando se tienen altos volúmenes de producción.
- Cuando el grado de complejidad de los artículos producidos es alto.

- Cuando se realizan cambios en un artículo a fin de darle actualidad o brindar una variedad de modelos.
- Cuando es necesario un alto grado de precisión (Ruiz, 2004).

2.1.4 Diferencia entre una máquina convencional vs máquina CNC.

Tabla 1.1 Máquina Convencional vs Máquina CNC.

Máquina Convencional	Máquina CNC
Se opera por una sola persona	Una persona puede operar muchas máquinas.
Es necesario localizar las dimensiones la pieza a través de un plano.	No es necesario localizar medidas en la pieza.
Es necesario la experiencia	No es necesario la experiencia.
El operador tiene el control de profundidad, avance, etc.	El programa tiene todo el control de los parámetros de corte.
Existen trabajos que es imposible realizar.	Luego que se ejecuta el programa virtualmente se realiza cualquier trabajo.

Fuente: (Urruegos, 2008)

2.1.5 Grados de libertad.

“Los “ejes” o grados de libertad de una máquina-herramienta son la cantidad máxima de dimensiones que pueden ser manejados simultáneamente. Las máquinas modernas poseen más de 8 ejes, siendo más versátiles que las máquinas convencionales.” (UNAL, 2014)

El número de ejes es lo que determina las posibilidades de movimiento de la máquina herramienta. Así, a mayor número de ejes, mayores posibilidades de movimiento o mayores grados de libertad. Es importante entender que, cuando se habla de ejes, se hace referencia a los ejes de un sistema cartesiano, (X, Y, Z,...). (Pyrosisproyect, 2013)

- De tres ejes.

Se trata de máquinas con posibilidad de movimiento horizontal, vertical y oblicuo, este último, como resultado de la combinación de movimientos entre mesa, ménsula y husillo. Permiten un control sobre el movimiento relativo existente entre la máquina herramienta y la pieza, en cada uno de los tres ejes del sistema cartesiano. (Pyrosisproyect, 2013)

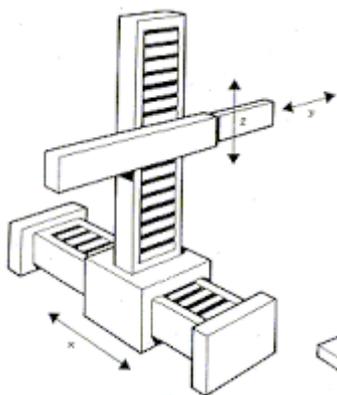


Figura 1.3 Tres grados de libertad.

Fuente: (Viscarra, 2008)

- De cuatro ejes.

Las máquinas de tipo cuatro ejes, cumplen todas las funciones descritas en el tipo anterior: movimiento relativo entre pieza y herramienta, en los tres ejes.

Añade la posibilidad de control de giro de la pieza, sobre uno de los ejes, gracias a un plato giratorio o mecanismo divisor. De esta forma, este tipo de máquinas está especialmente indicado a la hora de generar superficies labrando sobre patrones cilíndricos. Tal es el caso del labrado de ejes estriados o engranajes. (Pyrosisproyect, 2013)

- De cinco ejes.

Además de cumplir con todas las posibilidades de las descritas anteriormente; las máquinas de cinco ejes cuentan con dos particularidades. De una parte, permitir el control de giro de la pieza sobre dos de sus ejes. Uno de ellos perpendicular al husillo y el otro, paralelo (como en el caso de las de cuatro ejes, que se consigue por medio de un plato giratorio).

“De otra, permitir el giro de la pieza sobre un eje horizontal y que la herramienta pueda inclinarse alrededor de un eje, perpendicular al anterior.” (Pyrosisproyect, 2013)

2.1.6 Sistemas de transmisión.

“Los atributos diferenciales de cada uno de los componentes que integran la mecánica de las transmisiones, ejercerán una influencia determinante en la precisión y potencia de una máquina CNC.” (Castiglione, 2011)

En un router se deben confirmar cuatro capacidades básicas de movimiento:

- La gobernabilidad, dependerá del software por medio del cual serán suministradas las instrucciones a ejecutar por el router.
- La movilidad, referida principalmente a los tipos de movimientos, pueden ser de traslación (generalmente rectilíneos) o de rotación (en caso de disponer de un eje rotativo), ambos movimientos deben posibilitar la variación de la aceleración y de las velocidades de trabajo.
- La autonomía, contempla acciones de posicionamiento en su contexto. Y por último la polivalencia, característica que le otorga a la máquina, procesar operaciones diversas. (Castiglione, 2011)

a) Transmisión por tornillo de bolas recirculantes (ballscrew).



Figura 1.4 Husillo de bolas

Fuente: (NTN-SNR, 2014)

El tornillo de bolas es un componente transmisor de una fuerza mecánica mediante la transformación de un movimiento rotativo en uno rectilíneo. Garantiza una marcha suave, “muy liviana y cero juego”, mínimo rozamiento y aceptable velocidad de trabajo, controlada eficientemente con suma precisión, durante todos los desplazamientos. (Castiglione, 2011)

Está especialmente diseñado para que el rozamiento de cada bolilla con la superficie del tornillo sea despreciable, logrando de esta manera una insignificante pérdida de potencia por fricción, convirtiéndose esta cualidad en uno de los atributos más elocuentes de los tornillos de bolas. (Castiglione, 2011)

Los ballscrews comienzan a movilizarse con un muy bajo par de potencia, puede decirse que sólo requieren de un tercio de la potencia empleada para la transmisión de la misma fuerza con tornillos ordinarios.

“El avance se produce por el giro del tornillo, siendo uno de los más comunes avanzar cinco milímetros por vuelta.” (Castiglione, 2011)

b) Transmisión por piñón y cremallera.

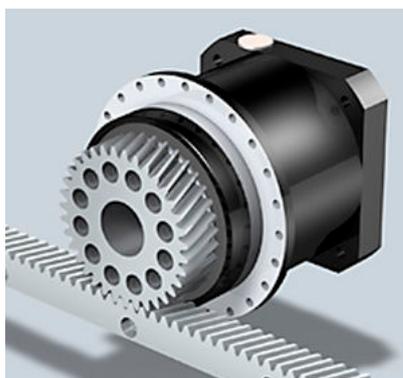


Figura 1.5 Piñón y cremallera.

Fuente: (NTN-SNR, 2014)

Ofrecen solidez y precisión en largos desplazamientos. Alternativa ideal para instalar en routers de robusta estructura, con puentes sobredimensionados para desplazar a régimen de velocidad de trabajo aceptable, motores de fresado de gran torque y peso, o cabezales superpoblados con diversos accesorios de trabajo. Es recomendable que las cajas reductoras se encuentren en sitios de fácil acceso para agilizar los programas de lubricación, limpieza y mantenimiento general. Este sistema garantiza décadas de vida útil. (Castiglione, 2011)

En un sistema de transmisión a piñón-cremallera, la precisión es de dos centésimas de milímetro, menor si se la compara con la centésima de milímetro que

ofrece el tornillo a bolas recirculantes (ballscrew), pero imperceptible y despreciable para la mayoría de los trabajos que se van a realizar. (Castiglione, 2011)

c) Transmisión por correa dentada.



Figura 1.6 Correas y poleas dentadas.

Fuente: (Productos Gearvel, 2012)

Los partidarios de este sistema hacen hincapié en la sencillez de su diseño, la utilización de la correa como fusible mecánico y elemento absorbente de choques de transmisión, la ventaja de no tener que engrasarla y la rapidez para su acople y desacople.

En impresoras y grabadoras láser las correas traccionan magnitudes relativamente livianas de escasa resistencia, pero el esfuerzo mecánico al que están sometidas en routers con pesados puentes, más cabezales transportando motores de fresado, sumado a la resistencia que genera el arranque de viruta, acrecienta el continuo e incesante aplastamiento de los dientes de la correa durante las marchas y contramarchas. (Castiglione, 2011)

Mientras la correa es nueva, su alma de nylon se contrae después de cada estiramiento. Pasado el tiempo esta elasticidad va desapareciendo (deja de contraerse), provocando el incremento de la distancia entre dientes, con la consecuente pérdida de exactitud en los desplazamientos. Luego comienza a desgastarse el recubrimiento de cada diente hasta llegar al fin de su utilidad. (Castiglione, 2011)

La exacta tensión de la correa es esencial para su óptimo funcionamiento. Si la tensión es alta provocará fatiga de materiales y fallas prematuras; si por el contrario la tensión es baja, causará deslizamientos y/o desplazamientos originando pérdidas de precisión y potencia, idénticos síntomas se manifestarían si surgieran en ella cortes o estiramientos. (Castiglione, 2011)

2.1.7 Actuadores.

a) Selección entre servomotores motores a paso.

Tabla 1.2 Tecnología de servomotores vs motores a pasos

MOTORES A PASOS	SERVOMOTORES
	
Fiabilidad y Mantenimiento	
<p>Motores paso a paso no tienen escobillas. Ellos experimentan poca o ningún desgaste, y son prácticamente libres de mantenimiento.</p>	<p>Servomotores que tienen escobillas requieren un cambio, por lo general, cada 5.000 horas. Como steppers, servomotores sin escobillas prácticamente no tienen necesidades de servicios.</p>
Resolución y Precisión	
<p>Para un paso de tornillo, los motores paso a paso de cuatro fases típicos pueden producir 200 pasos completos, 400 pasos medio, y hasta 25.000 micro pasos por revolución. Es importante señalar que puesto que el motor paso a paso es de bucle abierto, no necesariamente alcanza la ubicación deseada, especialmente bajo carga. Particularmente tiende a dar una pobre exactitud posicional al utilizar microstepping, que es principalmente útil para la suavidad de movimiento.</p>	<p>La resolución servomotor depende del encoder utilizado. Encoders típicos producen entre 2.000 y 4.000 impulsos por vuelta, y encoders con hasta 10.000 impulsos por vuelta también están disponibles. Desde servos, que son de ciclo cerrado, pueden y logran la resolución deseada, que son capaces de mantener la exactitud posicional.</p>

CONTINÚA →

Velocidad y Torque	
<p>Steppers tienen características de par muy pobres a velocidades más altas. Esta condición se mejoró algo por microstepping, sin embargo, a menos que el paso a paso se utiliza en un modo de bucle cerrado, no suelen realizar, así como un servo.</p>	<p>Los servos pueden producir velocidades y potencias dos a cuatro veces mayor que la de steppers tamaño similarmente. Esta mejora es un resultado directo del bucle cerrado (es decir, realimentación de posición constante), lo que permite una mayor velocidad y mayor fiabilidad. El bucle del servo también permite que un sistema de este tipo para utilizar mejor las capacidades de par de pico.</p>
Lazo cerrado vs. lazo abierto	
<p>Motores paso a paso se utilizan casi siempre en una configuración de bucle abierto. Si se utiliza en un bucle cerrado, que normalmente se convierten como, si no más, caro que los sistemas de servo motor. La naturaleza de bucle abierto de motores paso a paso es su principal inconveniente. Los comandos se emiten para mover cantidades prescritas, y salvo circunstancias imprevistas, el motor mueve las cantidades prescritas. En casos raros, resonancias o fuerzas inesperadas pueden causar un motor paso a paso para bajar de pasos o paralizar a cabo.</p>	<p>Por naturaleza, los servomotores tienen constante realimentación posicional. La retroalimentación de posición se utiliza para corregir cualquier discrepancia entre una deseada y una posición real. Esta constante resultados correctivas de acción en velocidades más rápidas (hasta tres veces el rendimiento), y una mayor potencia (hasta tres veces el par) a altas velocidades. La naturaleza de bucle cerrado de la servo también asegura que estancamiento no puede ocurrir a menos que haya un objeto inmóvil en el camino.</p>

Fuente: (Techno Inc., 2010)

b) Secuencia de control de motores a pasos

“Un motor paso a paso de dos fases, tiene dos bobinas dispuestas en forma tal que producen dos flujos magnéticos a 90° geométricos uno respecto del otro” (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013) tal como lo indica la figura 1.7.

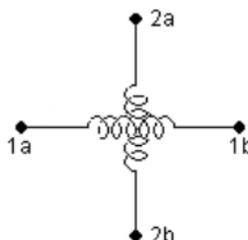


Figura 1.7 Disposición de las bobinas de un motor bipolar de dos fases.

Fuente: (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013).

“Si se energiza la bobina 1, el rotor del motor llega a una posición de equilibrio alineándose con el campo magnético generado por dicha bobina.” (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013). Ver figura 1.8.

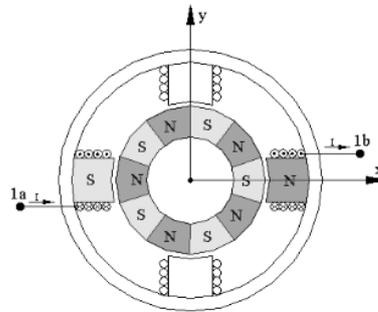


Figura 1.8 Motor a pasos, excitado por una bobina en posición de equilibrio a 0° .

Fuente: (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013).

“Excitando la bobina 2, el campo resultante gira 90° geométricos, con lo cual, el rotor realiza un desplazamiento angular igual al paso “P” del motor.” (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013). Ver figura 1.9.

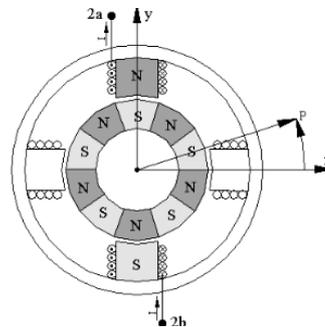


Figura 1.9 Motor a pasos, rotado a un paso de la posición de equilibrio a 0° .

Fuente: (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013).

El flujo magnético entre el rotor y el estator originan fuerzas que tienden a mantener al rotor en posiciones de equilibrio cada paso del motor.

“Excitando las dos bobinas en forma simultánea, el rotor intentará alinearse con los dos campos magnéticos generados y, debido a la naturaleza vectorial de los mismos, encontrará una posición de equilibrio en dirección al vector resultante de los dos campos.” (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013). Ver figura 1.10.

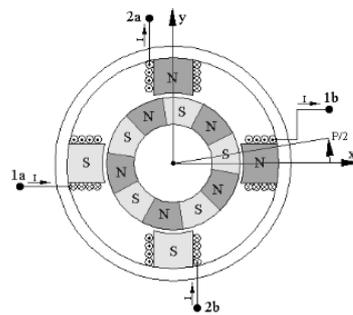


Figura 1.10 Motor paso a paso excitado por dos bobinas en forma simultánea

Fuente: (Berti, Roitman, & Verrastro, 2013).

c) Micropasos

Un motor paso a paso con un controlador micropasos es mejor que un controlador con el paso completo o medio. El motor paso a paso controlado con micropasos da pasos más pequeños y, por lo tanto, menos vibraciones. Así el sistema funciona más suavemente. Incluso si la resolución de un micro-paso no es necesaria, es mejor usarlo de todas formas. (ProductosCNC, 2014)

El atractivo de un motor paso a paso de dos fases con micropasos es convincente. Visiones de un motor de pasos híbrido de 1,8 grados con 256 micropasos de paso completo en su mente. La resolución de 51 200 micropasos por revolución que atrae. El verdadero compromiso es que a medida que aumenta el número de micropasos por paso completo el par incremental por micropaso cae drásticamente. Aumenta la resolución, pero la precisión en realidad es afectada. (MICROMO, 2014)

Pocos motores paso a paso tienen un par de torsión sinusoidal pura y todos tienen armónicos de orden superior que, de hecho distorsionan la curva y afectan a la precisión. Y mientras que los controladores microstepping han recorrido un camino demasiado largo, sólo se aproximan a una onda sinusoidal verdadera (MICROMO, 2014). La tabla 1.3 cuantifica drásticamente el impacto significativo del par incremental por microstep como una función del número de micropasos por paso completo.

Tabla 1.3 Torque incremental por Micropaso

Micropasos / paso completo	Par de retención / Microstepasos
1	100,00%
2	70.71%
4	38.27%
8	19,51%
16	9.80%
32	4,91%
64	2,45%
128	1.23%
256	0.61%

Fuente: (MICROMO, 2014).

2.2 Láser de CO₂

La utilización de láseres de CO₂ en aplicaciones industriales es bien conocida y ha sido explotada desde hace varias décadas en las industrias automotrices, aeronáuticas, electrónicas, textiles, entre otras; en áreas tan diversas como el corte, soldadura, micro soldadura, perforación, y tratamiento de materiales (Aboites & Torres Cisneros, 1986).

2.2.1 Generación del haz láser.

La generación del haz láser precisa de un medio activo, que tras un ciclo de excitación – desexcitación, emita fotones de una determinada longitud de onda. El medio activo puede ser un gas, como por ejemplo CO₂, un sólido, como los iones de neodimio embebidos en un cristal de itrio-granate-aluminio, o un líquido. En la figura 1.11 se muestra el medio activo en un láser de CO₂:

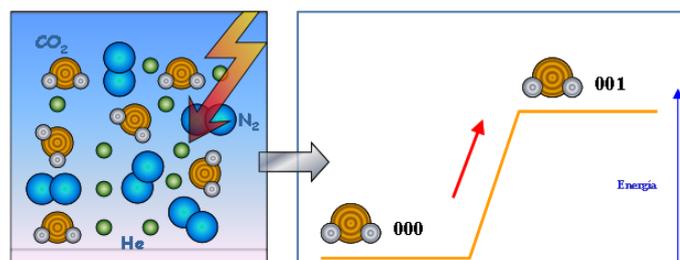


Figura 1.11 Cambio de nivel energético de las moléculas de CO₂.

Fuente: (Bermejo, 2007)

Las moléculas de CO₂ son excitadas mediante una descarga eléctrica, provocando que estas abandonen su nivel energético cuántico inferior (000) y se posicionen en su nivel cuántico superior (001).

Las moléculas de CO₂ en su estado cuántico superior (001) transmiten parte de su energía por emisión espontánea, poblando entonces niveles inferiores de energía. El salto energético que produce, se traduce en la emisión de un fotón cuya longitud de onda es de $\lambda=10.6 \mu\text{m}$.

“Los fotones así emitidos impactan con moléculas de CO₂ en estado cuántico superior, provocando la emisión de un nuevo fotón en fase con el primero. A este mecanismo se le conoce como emisión estimulada.” (Bermejo, 2007)

Si se hace atravesar repetidas veces la radiación láser a través del medio activo se conseguirá, apoyando en el mecanismo de la emisión estimulada, un efecto de amplificación de la propia radiación láser.

“Esto se consigue mediante un amplificador o resonador óptico, que consiste en una cavidad limitada, en un extremo un espejo totalmente reflectante, y por el otro extremo un espejo parcialmente reflectante que permite la salida de la radiación láser al exterior” (Bermejo, 2007). Ver figura 1.12.

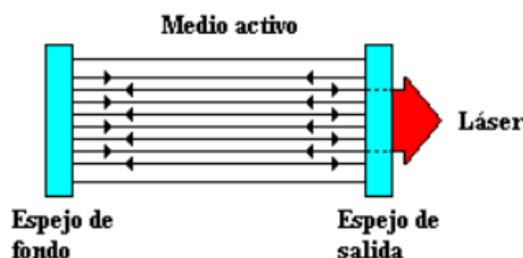


Figura 1.12 Amplificador óptico

Fuente: (Vallejo, 2007)

2.2.2 Categorías de láser CO₂

Basado en el diseño de su construcción, el láser de CO₂ puede pertenecer a alguna de las siguientes categorías:

a) Láser de flujo axial lento.

En este láser una mezcla de gas está fluyendo continuamente a través del tubo láser mientras se produce la acción láser. El flujo de gas se utiliza cuando se requiere la máxima potencia de salida del láser de CO₂. La mezcla de gas fluye lentamente a lo largo del tubo láser para remover la disociación de los productos, en particular CO, que de otra manera podría contaminar el láser. El calor es eliminado por difusión radial a las paredes del tubo de vidrio, enfriado externamente por un refrigerante (usualmente agua). Un espejo interno adecuado es a menudo usado, y, en el diseño de la figura 1.13, una de las monturas metálicas fijas a la cavidad de los espejos debe ser sujeta a un alto voltaje. La salida máxima de potencia por unidad de longitud de la descarga (50-60 W/m), el cual es obtenido, independientemente del diámetro del tubo. (Nahum, 2009)

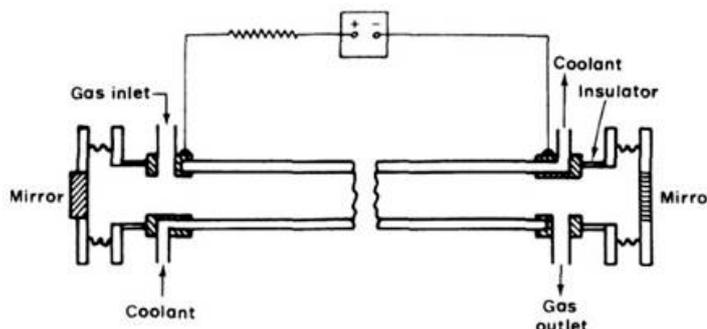


Figura 1.13 Diagrama esquemático de un láser de CO₂ de flujo axial lento.

Fuente: (Nahum, 2009)

b) Láser de tubo sellado.

El tubo láser se llena con la mezcla apropiada de gases y es entonces sellado. Se aplica un alto voltaje entre los electrodos situados a ambos extremos del tubo de gas. Los electrones acelerados excitan a las moléculas de gas. El problema con los láseres sellados es la disociación de las moléculas de CO₂ en CO y oxígeno al mismo tiempo. Para reducir este efecto, se añade a la mezcla de gases un agente catalítico. Si el flujo de la mezcla de gas es detenido en el arreglo de la figura 1.14, la acción láser cesa varios minutos. Esto surge porque los productos de la reacción química formados en la descarga (CO en particular) no son removidos pero pueden ser absorbidos por las

paredes o reaccionar con los electrodos, entonces puede llegar el equilibrio $\text{CO}_2 - \text{CO} - \text{O}_2$. (Nahum, 2009)



Figura 1.14 Tubo de láser de CO_2 sellado.

Fuente: (Eastern Laser, 2014)

c) Láser de guía de ondas.

Cuando el diámetro del tubo se reduce a un tamaño de alrededor de 1 milímetro, éste se convierte en una guía de ondas. La radiación dentro de un tubo de pequeño diámetro está confinada a moverse a lo largo del tubo, con bajas pérdidas. Estos pequeños láseres de CO_2 pueden producir hasta 50 watts de radiación continua. Si el diámetro del tubo de láser en la figura 1.15 es reducido alrededor de unos cuantos milímetros (2-4mm), se llega a una situación donde la radiación láser es guiada por las paredes interiores del tubo. Los tubos de BeO (óxido de berilio) o SiO_2 (dióxido de silicio) son los que dan el mejor rendimiento. (Nahum, 2009)

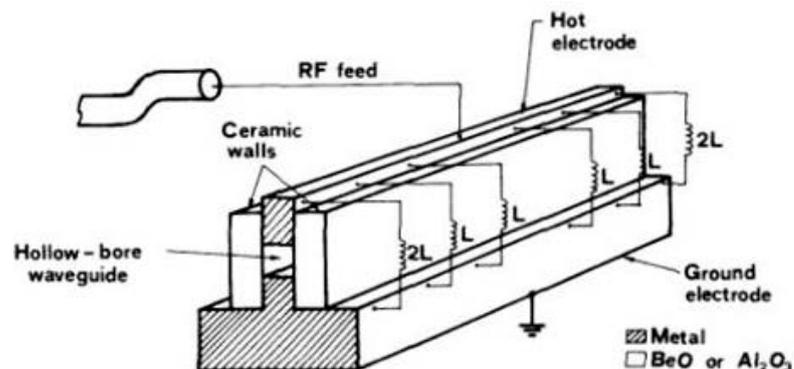


Figura 1.15 Diagrama esquemático de un láser de guía de onda de CO_2

Fuente: (Nahum, 2009)

d) Láser de flujo transversal.

Cuando el flujo de gas en el láser es perpendicular al eje del láser, es posible mantener un flujo mucho mayor debido a que la distancia es muy corta. Ya que el enfriamiento por el flujo de gas es muy eficiente, es posible obtener una alta potencia de salida en estos láseres. Tanto el flujo de gas como la descarga eléctrica se producen a lo largo de la anchura del láser. El flujo transversal se usa para láseres de CO₂ de muy alta potencia. (Nahum, 2009)

2.2.3 Parámetros del haz láser.

a) Potencia e intensidad del haz láser.

La potencia del láser es la energía emitida en forma de luz por unidad de tiempo. La unidad utilizada es el vatio (W). El tamaño de las máquinas láser, en cuanto a su capacidad de procesamiento y velocidades esperadas, se mide en términos de potencia láser. (Bermejo, 2007)

La intensidad del haz se define como el cociente entre la potencia del láser y el área irradiada en el foco. Por ejemplo al focalizar un haz láser de 1000 W sobre un punto de diámetro 0,1 mm, la intensidad láser resultante será de 127.000 W/mm². (Bermejo, 2007)

$$\text{Área: } \pi * r^2$$

$$\text{Área: } \pi * (0.05 \text{ mm})^2 = 0.00785 \text{ mm}^2$$

$$\text{Intensidad del láser: } \frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} = 127.000 \text{ W/mm}^2$$

b) Longitud de onda.

Es la longitud de un ciclo de la onda electromagnética (constituida por un campo eléctrico E y un campo magnético H perpendicular al primero) que constituye la radiación láser (ver figura 1.16).

La longitud de onda puede condicionar el procesamiento de ciertos materiales, así por ejemplo el vidrio es transparente a la radiación láser con longitudes de onda en el visible o en el infrarrojo cercano como es el caso del láser de estado sólido Nd:YAG,

o en el caso del Aluminio donde se absorbe mejor la radiación de longitud de onda 1,06 μm (Nd:YAG) que la de 10,6 μm (CO₂). No obstante el efecto que tiene la longitud de onda en el nivel de absorción de la radiación láser por parte del material, no es comparable al que tiene la intensidad del haz láser. (Bermejo, 2007)

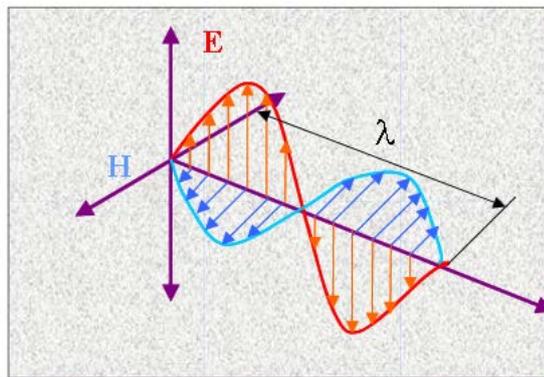


Figura 1.16 Longitud de Onda de un láser de CO₂.

Fuente: (Bermejo, 2007)

c) 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. (Bermejo, 2007)

2.2.4 Distancias focales de lentes para láser CO₂.

Las lentes se utilizan para concentrar el haz láser en las máquinas láser de CO₂. Existen muchas opciones de lentes y éstas dependen de la longitud de onda láser, de la potencia, la distancia focal, entre otros; es por esto que hay tanta variedad de elementos ópticos. Es posible encontrar varios tipos de lentes que se pueden utilizar: convexa cóncava, plano-convexa. Normalmente en las máquinas, se utiliza los lentes tipo plano-convexa (PEREZCAMPS, 2009). (Ver figura 1.17)



Figura 1.17 Plano convexo.

Fuente: (PEREZCAMPS, 2009)

La distancia focal es uno de los parámetros que definen a la lente. Cuando el rayo láser se concentra, se produce un efecto de doble cono invertido, donde el punto central entre los 2 conos (punto de unión) se convierte en el punto focal o spot.

“El tamaño del punto focal es directamente proporcional a la distancia focal de la lente, e inversamente proporcional al diámetro del haz a la entrada de la lente” (PEREZCAMPS, 2009) como se muestra en la figura 1.18.

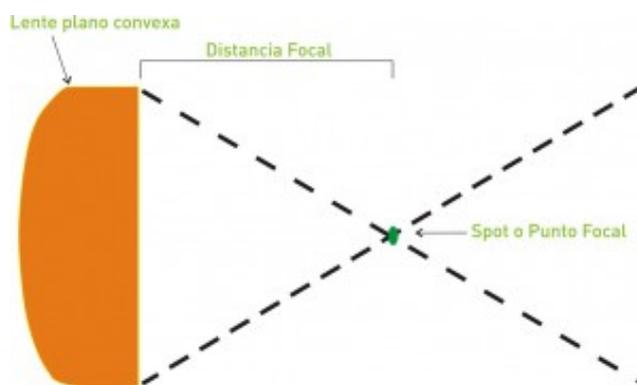


Figura 1.18 Distancia focal.

Fuente: (PEREZCAMPS, 2009)

La distancia que separa la cara inferior de la lente con el punto focal, se llama distancia focal, esta es medida en pulgadas. Cuanta mayor distancia focal, mayor profundidad de campo. De esta manera, una lente focal corta es ideal para cortar materiales finos o hacer grabado, ya que el punto es más pequeño, hay más concentración de energía y es posible conseguir una mayor definición de grabado (PEREZCAMPS, 2009).

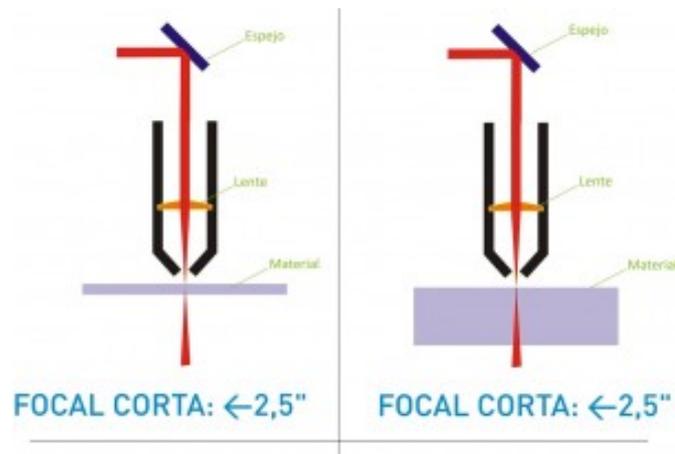


Figura 1.19 Distancia focal corta para diferentes espesores.

Fuente: (PEREYCAMP, 2009)

La lente focal corta es mejor para el corte de material fino (<10 mm) pero en el caso de material grueso, no se podrá cortar porque produce un corte cónico, es decir, la profundidad de campo es menor y no llegaría a cortar bien (PEREYCAMP, 2009). (Ver figura 1.19)

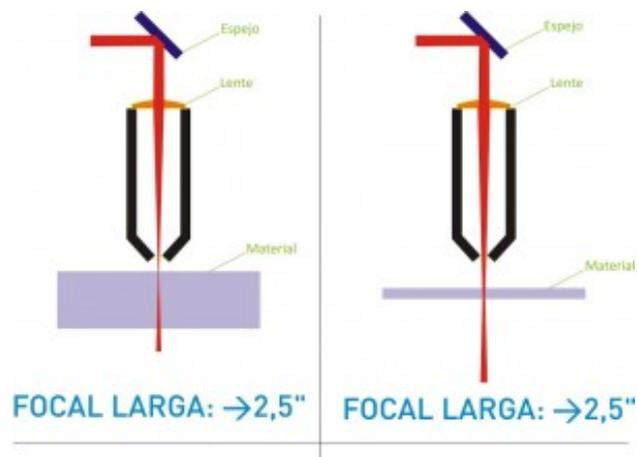


Figura 1.20 Distancia focal larga para diferentes espesores.

Fuente: (PEREYCAMP, 2009)

En cambio, una lente con una distancia focal mayor (a partir de $2,5''$) será perfecta para cortar materiales gruesos, el corte será recto debido a una menor divergencia del haz láser. Si se cortara materiales finos, tendrá menor concentración de energía y poca resolución en el marcado, por lo que no será adecuada. (PEREYCAMP, 2009)

Para el material ondulado en cambio, una lente focal larga irá muy bien porque al tener mayor profundidad de campo, en las zonas más altas y más bajas podrá cortar de forma uniforme, sin embargo con una lente focal corta, el corte no será uniforme (PEREZCAMPS, 2009).

2.3 Software y hardware libre

2.3.1 Hardware libre

A la sombra del crecimiento del software libre, ha aparecido en los últimos años el llamado hardware libre. Su objetivo es crear diseños de aparatos informáticos de forma abierta, de manera que todas las personas puedan acceder, como mínimo, a los planos de construcción de los dispositivos. Lejos de ser una novedad, esta corriente enlaza directamente con década de los 70, cuando los primeros aficionados a los ordenadores construían sus propios equipos en los garajes con piezas compradas a diferentes fabricantes y creaban sus propias implementaciones (Delgado, 2002).

a) Clasificaciones del hardware libre.

Según su naturaleza, se puede clasificar en Hardware reconfigurable y en Hardware estático.

- **Hardware Reconfigurable.**

Es aquél que viene descrito mediante un lenguaje de descripción de hardware. Donde los diseños son ficheros de texto, que contienen el código fuente. Se les puede aplicar directamente una licencia libre, como la GPL. Los problemas no surgen por la definición de qué es libre o qué debe cumplir para ser libre, sino que aparecen con las herramientas de desarrollo necesarias. Para hacer que el hardware reconfigurable sea libre, sólo hay que aplicar la licencia GPL a su código (González & González, 2003).

- **Hardware estático**

Es el conjunto de elementos materiales de los sistemas electrónicos, con existencia física, se pueden "tocar". La palabra "software" refiere tanto al código fuente como a los ejecutables, mientras que las palabras "hardware" y "diseño de hardware" se refieren claramente a dos cosas distintas. Usar la palabra "hardware" como taquigrafía para el diseño y el objeto físico es una receta para la confusión.

“Hardware fuente abierta, se refiere al hardware para el cual toda la información del diseño se pone a disposición del público en general. Open Source hardware se puede basar en un Diseño de hardware libre” (González & González, 2003).

b) Ventajas del hardware libre

- Independencia tecnológica, a las naciones.
- Favorece la calidad del hardware, a los estándares abiertos y que sean más económicos.
- El trabajo colaborativo sobre los diseños permite la reutilización y la adaptación de los mismos.
- Disminuye los costos y tiempos de diseño en sus trabajos.
- Se libera a los productores de los propietarios de alianzas globales (ECURED, 2011).

c) Desventajas del hardware libre

Las cuatro libertades del Software libre no se pueden aplicar directamente en el Hardware, naciendo estas dificultades:

- Los diseños son específicos y únicos, dificultando su reproducción.
- La reproducción implica primero la prueba de los componentes, para luego fabricar el dispositivo, lo que eleva los costos.
- La disponibilidad de los chips, haciéndose dificultoso para muchos países en vías de desarrollo.
- La fabricación de hardware lleva implícito infraestructura de diseño, simulación, producción e implementación, al contrario de lo que se da en el software libre (ECURED, 2011).

2.3.2 Sistemas embebidos

Se entiende por sistemas embebidos a una combinación de hardware y software de computadora, sumado tal vez a algunas piezas mecánicas o de otro tipo, diseñado para tener una función específica. Es común el uso de estos dispositivos pero pocos se dan cuenta que hay un procesador y un programa ejecutándose que les permite funcionar. (Galiana, 2005)

“Se pueden definir como todo sistema que NO es una PC de escritorio, ni un servidor, ni una workstation, ni una supercomputadora, en fin, NO es un sistema programable de propósito general.” (Pedre, 2012)

Son sistemas diseñados para cumplir una o pocas funciones dedicadas y que está embebido como parte de algún dispositivo de hardware completo. Por ejemplo:

- Embebidos en industria automotriz: navegador GPS, de la aviación: piloto automático, control de aterrizaje
- Embebidos en telecomunicaciones: routers, modems
- Embebidos en comunicaciones: teléfonos celulares. (Pedre, 2012)

Comparación plataformas embebidas más sobresalientes.

Existen diferentes tipos de tarjetas que implementan el concepto de hardware libre, a continuación se muestra una tabla comparativa entre cada una de ellas.

Tabla 1.4 Comparación plataformas embebidas más sobresalientes.

	Arduino Yun	Beaglebone Black	Intel Galileo	Raspberry Pi
Imagen				
SoC	Atheros AR9331	Texas Instruments AM3358	Intel Quark X1000	Broadcom BCM2835
CPU	MIPS32 24K y ATmega32U4	ARM Cortex-A8	Intel X1000	ARM1176
Arquitectura	MIPS and AVR	ARMv7	i586	ARMv6
Velocidad	400mhz (AR9331) y 16mhz (ATmega)	1ghz	400mhz	700mhz

CONTINUÍA →

Memoria	64MB (AR9331) y 2.5KB (ATmega)	512MB	256MB	256MB (model A) o 512MB (model B)
FPU	None (Software)	Hardware	Hardware	Hardware
GPU	Ninguno	PowerVR SGX530	None	Broadcom VideoCore IV
Almacenamiento Interno	16MB (AR9331) y 32KB (ATmega)	2GB (rev B) o 4GB (rev C)	8MB	None
Almacenamiento Externo	MicroSD (AR9331)	MicroSD	MicroSD	SD card
Red	10/100Mbit ethernet y 802.11b/g/n WiFi	10/100Mbit ethernet	10/100Mbit ethernet	None (model A) or 10/100Mbit ethernet (model B)
Tamaño	2.7in x 2.1in (68.6mm x 53.3mm)	3.4in x 2.1in (86.4mm x 53.3mm)	4.2in x 2.8in (106.7mm x 71.1mm)	3.4in x 2.2in (85.6mm x 56mm)
Precio Aproximado	\$75	\$55 (rev C), \$45 (rev B)	\$80	\$25 (model A), \$35 (model B)

Fuente: (DICOLA, 2014)

2.3.3 Software libre

Es aquel que respeta la libertad de los usuarios y la comunidad. En grandes líneas, significa que los usuarios tienen la libertad para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software. Es decir, el software libre es una cuestión de libertad, no de precio. Para entender el concepto, piense en libre como en libre expresión, no como en barra libre (GNU, 2014).

a) Ventajas del software libre

El software libre conlleva toda una serie de ventajas sobre el software propietario por los derechos que otorga a sus usuarios. Algunas de estas ventajas pueden ser más apreciadas por los usuarios particulares, otras por las empresas, y otras por las administraciones públicas. Desgraciadamente el software libre ha sido objeto de desinformaciones y mitos, algunos provocados deliberadamente, que han intentado distorsionar su credibilidad (Barahona Robles & Gregorio, 2003).

- **Coste.**

Para la mayoría de usuarios individuales el software libre es una opción atractiva por las libertades que garantiza sin necesidad de verse sobrecargados por el precio. Sin embargo, en el caso de empresas y la administración pública, el coste del software es un factor importante y a veces determinante en la elección de nuevos sistemas informáticos. (Mas, 2003)

- **Innovación tecnológica**

El modelo del software libre, donde prima el hecho de compartir la información y el trabajo cooperativo, es bastante similar al que tradicionalmente se ha usado en el mundo académico y científico. En estos ámbitos, los resultados de las investigaciones se publican y se divulgan en publicaciones científicas, y sirven de base para nuevas investigaciones. Éste es principalmente el modelo sobre el que la humanidad ha innovado y avanzado. (Mas, 2003)

- **Requisitos de hardware y durabilidad de las soluciones**

Aunque resulta imposible generalizar, sí que existen casos bien documentados donde las soluciones de software libre tienen unos requisitos de hardware menor, y por

lo tanto son más baratas de implementar. Por ejemplo, los sistemas Linux que actúan de servidores pueden ser utilizados sin la interfaz gráfica con la consecuente reducción de requisitos de hardware necesarios. (Mas, 2003)

- **Escrutinio público**

El modelo de desarrollo de software libre sigue un método donde el software se escribe de forma cooperativa por programadores, en gran parte voluntarios, que trabajan coordinadamente en Internet. Lógicamente, el código fuente del programa está a la vista de todo el mundo, y son frecuentes los casos en que se reportan errores que alguien ha descubierto leyendo o trabajando con ese código. (Cusumano , 2004).

- **Independencia del proveedor.**

Uno de los grandes problemas en la industria del software es la dependencia que se crea entre el fabricante y el cliente. Este hecho se acentúa con especial gravedad cuando el fabricante no entrega el código fuente, ya que inevitablemente el cliente queda atado a él para nuevas versiones y, en general, para cualquier mejora que necesite. (Cusumano , 2004).

- **Adaptación del software.**

El software propietario habitualmente se vende en forma de paquete estándar, que muchas veces no se adapta a las necesidades específicas de empresas y administraciones. El software libre permite personalizar, gracias al hecho de que está disponible del código fuente, hasta que cubran exactamente la necesidad. La personalización es un área muy importante en que el software libre puede responder mucho mejor que el software de propiedad a unos costes mucho más razonables (Cusumano , 2004).

b) Open Source

Durante el año 1998, Eric S. Raymond, Bruce Perens y otros hackers involucrados en el desarrollo de software libre lanzaron la Open Software Initiative y propusieron el uso de término open source (código abierto) en contraposición al término free software (software libre) como término más atractivo al entorno empresarial. El término free software en el mundo anglófono creaba una

situación incómoda debido a la doble acepción que en inglés tiene el término free (que puede significar gratuito o libre). La gran mayoría de empresas en Estados Unidos usan principalmente el término código abierto para evitar dar la percepción que el software libre es un recurso totalmente gratuito y para poner énfasis en valor diferencial que representa el hecho de que el código fuente está disponible (García, 2000).

Bruce Perens, de la Open Source Initiative y antiguo coordinador de la distribución de Linux Debian, creó una lista de condiciones que debe cumplir un programa para ser poder considerado Open Source. Estas condiciones son muy similares y están basadas, en las directrices de software libre de Debian. Estas condiciones también son aplicables a cualquier programa que sea software libre y pueden ayudar a matizar sus implicaciones (Himanem, 2001).

- Libre distribución. No se puede impedir la venta o distribución del programa o parte de él. Así mismo, tampoco se puede exigir el pago de una tasa a cambio de su distribución por parte de terceros.
- Código fuente. El programa debe incluir su código fuente y no se puede restringir su redistribución.
- Trabajos derivados. No debe impedirse realizar modificaciones o trabajos derivados del programa y debe permitirse que estos sean distribuidos bajo los mismos términos del software original.
- Integridad del código de fuente original. Puede exigirse que una versión modificada del programa tenga un nombre y número de versión diferente que el programa original para poder proteger al autor original de la responsabilidad de estas versiones.
- No discriminación contra personas o grupos. Las condiciones de uso del programa no pueden discriminar contra una persona o un grupo de personas. No discriminación contra usos. No se puede negar a ninguna persona hacer uso del programa para ningún fin como, por ejemplo, comercial o militar.
- Distribución de la licencia. Los derechos del programa deben aplicarse a todos quienes se redistribuyen el programa sin ninguna condición adicional.

- La licencia no debe ser específica de un producto. Los derechos garantizados al usuario del programa no deben depender de que el programa forme parte de una distribución o paquete particular de software.
- La licencia no debe restringir otro software. La licencia no debe poner restricciones en otros programas que se distribuyen junto con el software licenciado.
- La licencia debe ser tecnológicamente neutra. No puede existir ninguna disposición de la licencia que obligue al uso de una tecnología concreta (Himanem, 2001).

c) LasaurApp

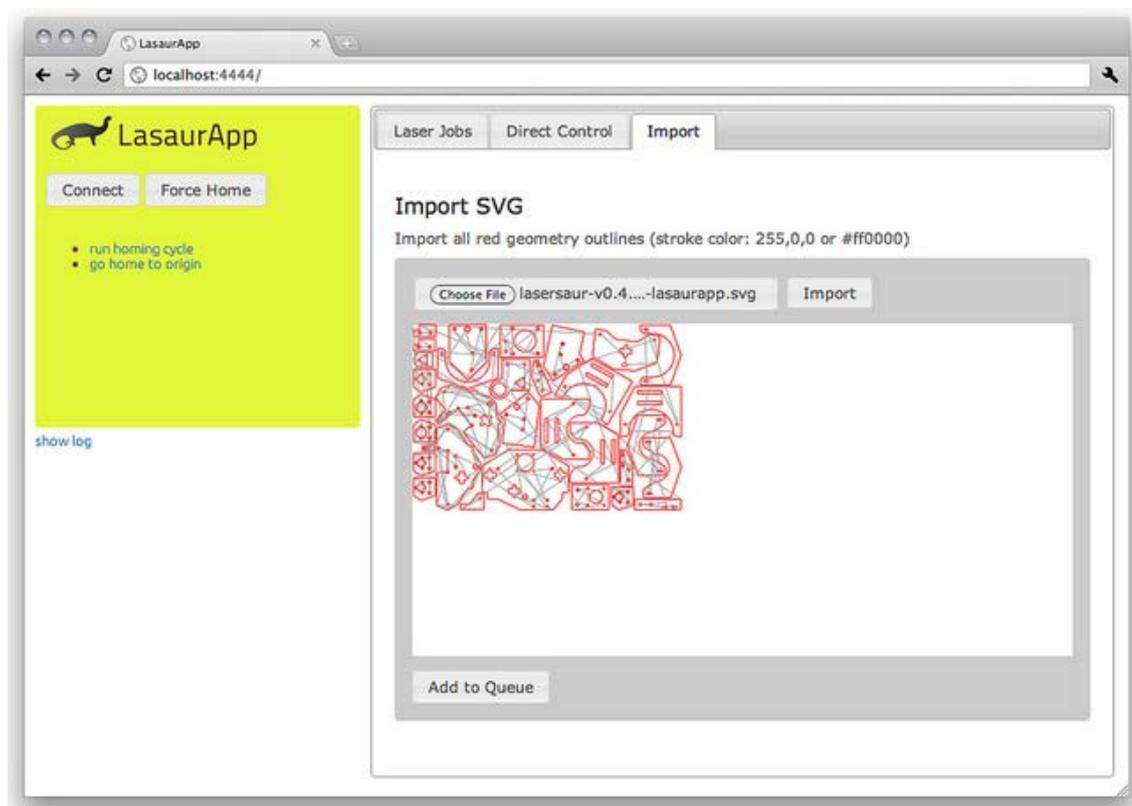


Figura 1.21 LasaurApp.

Fuente: (Hechenberger, lasersaur, 2014)

LasaurApp es una aplicación de control principal para Lasersaur (Láser CNC). Se instala en el driver de Lasersaur y se accede a través de la red local (Ethernet o WiFi) con un navegador web. Una Lasersaur normalmente no requiere ninguna

instalación de software o el controlador en el ordenador del usuario y está puede acceder a través de <http://lasersaur.local>.

Las principales características son las siguientes:

- Enviar archivos vectoriales para la Lasersaur
- Importar archivos y optimizar
- Formatos de archivo admitidos son: SVG, G-Code, DXF
- GUI para mover / correr la cabeza del láser
- Parada, pausa, trabajos continuos
- Programas de código G útiles para el proceso de calibración óptica (Hechenberger, lasersaur, 2014).

2.4 Corte y grabado de madera

2.4.1 Madera

El empleo de los procesos de arranque de material para la fabricación de componentes se remonta a la prehistoria. Los primeros materiales que fueron conformados por arranque de material fueron la piedra y la madera. Existen evidencias arqueológicas de que los egipcios emplearon mecanismos rotatorios formados por palos y cuerdas para realizar taladros. (Estrems, 2004)

“Pocos materiales poseen la capacidad de evocación de la madera. Durante miles de años el hombre la ha manipulado para que sirviera a sus necesidades y, aún en nuestros días, tipologías ancestrales continúan siendo válidas.” (Jimenez, 2013)

a) Propiedades de la Madera

Algunas de las propiedades más importantes de la madera y que las diferencian entre sí son:

- **Resistencia.-** Es la capacidad de resistir a esfuerzos como la compresión, la flexión, los impactos o las tensiones repetidas.
- **Dureza.-** Es la propiedad por la que la madera no puede comprimirse (aplastarse) fácilmente.

- **Rigidez.-** Gracias a esta propiedad la madera no puede ser deformada con facilidad.
- **Densidad.-** Define lo compacta (apretada) que es la madera. (Gobierno de España., 2015)

“Estas diferencias entre las características de unas maderas y otras son las que determinan los usos más adecuados para cada una de ellas.” (Gobierno de España., 2015)

b) Clasificación de la Madera

“La clasificación de las maderas, a veces, llevan a la confusión al confundir el tipo de madera con la densidad de la madera. Las maderas se clasifican en dos: Las denominadas maderas blandas y las maderas duras.” (Bricolaje, 2013)

- **Maderas blandas:** Son fundamentalmente las coníferas. Las formas de estos árboles son altos, espigados y en punta. Son árboles de crecimiento rápido y escasa densidad, dando lugar a troncos rectos y largos que pueden ser cultivados rentablemente en bosques particulares. Además, las maderas blandas son fáciles de trabajar y de escasa resistencia. Dentro de la tipología de maderas blandas se encuentra:

Maderas blandas (por ejemplo: el abeto, el pino)

Muy blandas (por ejemplo: el chopo, el sauce). (Bricolaje, 2013)

- **Maderas duras:** Son de crecimiento lento y mayor densidad. Se puede decir sin ánimo de errar que las maderas duras son el resto de los árboles, aunque sólo algunos se utilizan con fines comerciales. Están pues distribuidas por todos los lugares del mundo. Las maderas duras, a su vez, se clasifican en:

Durísimas (por ejemplo: el ébano, el boj, la encina).

Duras (por ejemplo: el cerezo, el olmo, el roble).

Semiduras (la haya, el castaño). (Bricolaje, 2013)

c) Procesos de corte en madera

Se define el corte como el proceso de transformación mecánica del material para producir cambios de:

- Forma
- Dimensiones
- Calidad superficial

La transformación se produce con dos movimientos relativos entre el elemento cortante y el material. El elemento cortante es una herramienta de corte que remueve capas del material, llamada viruta. El corte recibe también el nombre de operación de mecanizado.

Los dos movimientos relativos son:

- Un movimiento de avance.
- Un movimiento principal o de corte. (Ramos, 2003)

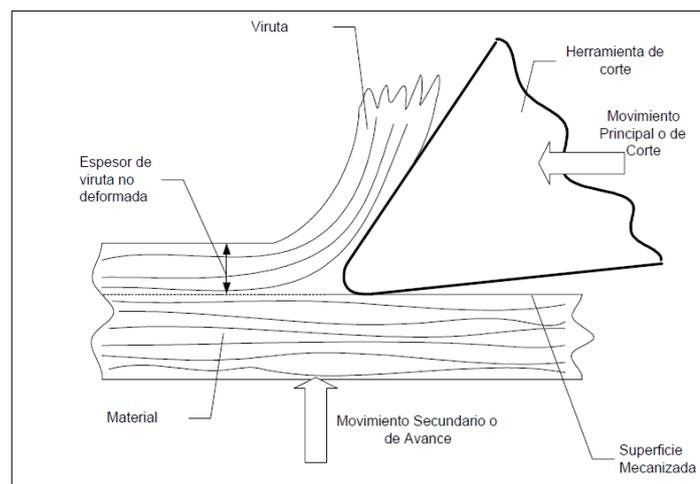


Figura 1.22 Movimientos de la herramienta de corte.

Fuente: (Ramos, 2003)

d) Direcciones de corte

Debido a que la madera es un material anisotrópico y en particular ortotrópico, sus propiedades pueden definirse según tres ejes de coordenadas. R (Radial), L (Longitudinal) y T (Tangencial). La variabilidad de las propiedades, en particular de las propiedades mecánicas obliga a especificar el corte según las direcciones R, L y T. (Ramos, 2003) . Observar figura 1.23.

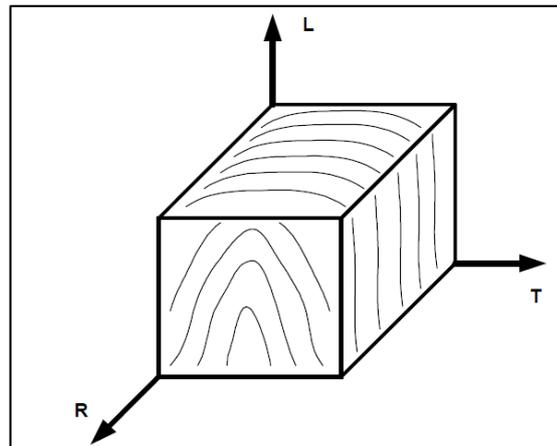


Figura 1.23 Ejes ortotrópicos.

Fuente: (Ramos, 2003)

e) Corte de madera con láser CO₂

En su estado natural la madera deja cortar y grabar fácil y confortablemente con sistemas láser. A pesar de la madera que es un material heterogéneo, no obstante es muy apropiada para el proceso a base de láser, artículos de madera son unas de las decoraciones más requeridas en el sector privado y comercial, también artículos publicitarios son elaborados a base de madera, por medio de grabados a láser en filigrana, esta se puede personalizar y mejorarse aún más ópticamente. (EUROLASER)

En el corte de madera con láser es especialmente importante trabajar a altas velocidades de procesamiento para obtener cantos limpios. Las máquinas con láser producen un corte limpio y cantos lisos, incluso cuando los objetos presentan formas y tamaños muy complejos. Desaparecen los largos y laboriosos procesos de limpieza, ya que en el tratamiento con láser de la madera no se producen astillas. (TROTEC, 2014)

La resina de la madera se mezcla junto con los humos y produce un residuo. Si la madera tiene un recubrimiento de poliuretano esto protege la madera de los daños de la resina y humos. Para eliminar la resina de los materiales recubiertos es fácil con una gamuza húmeda; si no existe recubrimiento habría que después lijar la superficie para eliminar la resina. (EPILOG)

- **Aire comprimido**

Su función es aumentar la presión para desplazar el CO₂. Dicho proceso se realiza a través de aumentar la presión, esto ocasiona que la energía cinética impulse el CO₂ a fluir.

“Es un complemento importante encargado de brindar ventilación al equipo, con el fin de proteger el lente óptico de la máquina.” (Castro, 2010)

“El auxiliar de aire elimina el calor y gases combustibles de la superficie de corte.” (EPILOG)

- **Profundidad de corte**

Para aplicarla de la manera correcta, se debe considerar el siguiente postulado “a mayor velocidad, menor profundidad de corte y a menor velocidad, mayor profundidad de corte”, y paralelamente, tener en cuenta también, el grado de potencia de la máquina. Por citar un ejemplo, cuando el equipo trabaja con una velocidad al 100 por ciento y una potencia al 100 por ciento, el corte es poco profundo, pero si la velocidad disminuye, el corte alcanzará un mayor nivel de profundidad. (Castro, 2010)

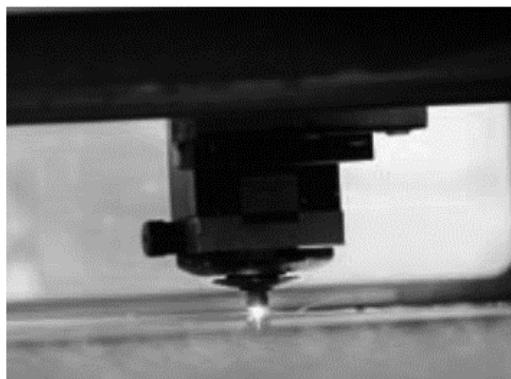


Figura 1.24 Cortador láser.

Fuente: (Castro, 2010)

- **Frecuencia del haz de láser**

Consiste en el tiempo que tarda el rayo láser en pasar por un punto determinado, varía su graduación dependiendo del material a mecanizar.

En materiales como el cuero o las maderas, los proveedores de estos equipos recomiendan conservar una frecuencia baja, dado que son superficies inflamables que al contacto con el rayo láser, pueden provocar llama, hasta el punto de incendiarse y por ende, acabar con la superficie y la pieza misma. En materiales como el balsa, la recomendación apunta a manejar frecuencias entre los 150 y 300 Hz, a fin de evitar bordes con afectados e irregulares. (Castro, 2010)

Para trabajos con MDF, se recomienda conservar una frecuencia entre 2.500 y 3.500 Hz, sobre todo en materiales con excelente comportamiento en procesos de corte, propiedad que depende de su nivel de calidad pues algunos tableros contienen demasiadas partículas o residuos que generan demasiada llama e impiden la profundización del corte. (Castro, 2010)

Con las maderas macizas, la sugerencia es que el operario analice su grado de rigidez y estime la llama que pueda generar al contacto con el rayo láser; que el operario realice un primer corte para verificar la intensidad de la llama y de acuerdo a los resultados obtenidos, varíe la frecuencia que mejor se ajuste a dicho proceso. (Castro, 2010)

- **Velocidad de corte**

Cuando la velocidad de corte aumenta, se forman estrías en el borde del corte más prominentes, y la penetración se pierde.

Cuando la velocidad de corte es demasiado baja, se produce una excesiva quema del borde de corte, lo que degrada la calidad del borde y aumenta ancho de la sección de corte. En general, la velocidad de corte de un material es inversamente proporcional a su espesor. (Lohr, 2011)

En la tabla 1.5 se muestra una base de datos realizada con la máquina Lasersaur donde se describe el material, la velocidad y la potencia utilizada para realizar cortes en diferentes espesores y materiales.

Tabla 1.5 Pruebas realizadas con máquina Lasersaur.

MATERIAL	ESPESOR	VELOCIDAD [mm/min]	P USADA [W_{eff}]
ACETAL	6.0	150	59
ACRILICO	4	1000	100
	3.0	400	59
	5.5	600	100
	6.35	300	59
BALSA	3.0	1300	47
	6.0	1300	59
	2.25	1520	47
	1.5	1520	47
	4.5	1300	47
CARTON	1	1000	78
	0.5	1500	42
	6	1000	100
	3.0	2000	59
	4.0	1700	59
MDF	6.0	600	60
	7.0	500	60
	2.0	900	59
LÁMINA TRIPLEX	10	500	100
	3.0	800	59
	1.6	1200	59
	4	1000	100

Fuente: (NORTD Labs, 2012)

2.4.2 Procesos de grabado

Un grabado es una estampa obtenida por impresión de una matriz, preparada para retener la tinta en aquellas partes que definen las formas representadas.

Existen cuatro tipos de impresión: en relieve, en hueco, planográfica y serigráfica.

- La impresión en relieve es aquella en la que imprime, precisamente, la zona que no se ha tallado; es el caso de la xilografía, la linoleografía.
- La impresión en hueco, es aquella en la que estampa la zona que ha sido grabada, ya que la tinta se introduce en los surcos producidos en la acción de grabar.
- La impresión planográfica, se basa en el principio de la repulsión entre la grasa y el agua; el ejemplo más evidente lo constituye la litografía.
- La impresión serigráfica, procedimiento de estampación mediante estarcido. (Rojas, 2008)

a) Antecedentes

La técnica del grabado en madera se conocía desde antes de la aparición de la imprenta. A finales del siglo 16, las estampas xilográficas circularon en gran número, y pronto se adoptó la costumbre de ilustrar los libros impresos con xilografías. (DISEÑOS DIGITALES, 2010)

Esta técnica fue desarrollada a finales del siglo 18 por Thomas Bewick, cuyo trabajo diferenciado de grabados anteriores en dos aspectos. En primer lugar, en lugar de utilizar las herramientas de talla de madera, tales como cuchillos, Bewick utiliza buril de grabador. Con esto él fue capaz de crear líneas delicadas muy delgadas, a menudo con grandes áreas oscuras en la composición. En segundo lugar, el grabado de madera utiliza tradicionalmente el grano del extremo de la madera, mientras que en la técnica anterior de grabado se utiliza el grano lado más suave. La mayor dureza y durabilidad que resultó permitió para obtener imágenes más detalladas. (E-CENTRO, 2012)

Grabado de madera fue utilizado con gran efecto por los artistas del siglo 19 tales como Edward Calvert y su época de esplendor duró hasta principios y mediados

del siglo 20, cuando los logros notables fueron hechas por Eric Gill, Eric Ravilious y otros. La técnica aún está apreciada en el siglo 21 como una técnica especializada de alto nivel de la ilustración de libros, y es promovido por la Sociedad de Grabadores de madera que tienen una exposición anual en Londres y otras sedes regionales británicas. (E-CENTRO, 2012)

b) Técnicas de grabado

• Grabado en relieve

“Se trata de excavar en la matriz los blancos de la imagen y en relieve las líneas que resaltarán las partes tintadas.” (Martinez, 2014)

“Xilografía.- un procedimiento de grabado en relieve sobre una plancha de madera, se trata pues de grabar a mano un dibujo, que posteriormente se excava con ayuda de gubias, y una vez entintada la superficie se imprime.” (Gallardo, 2000)



Figura 1.25 K. Kollwitz: La sombra. 1924 (Xilografía).

Fuente: (Martinez, 2014)

• Grabado en hueco

“Se trata de arañar la matriz y en los huecos que se abren (tallas) se deposita la tinta, que por medio de una fuerte presión se trasladará al papel.” (Martinez, 2014)



Figura 1.26 A. Dürero: Melancolía I. 1514. (Grabado a buril).

Fuente: (Martinez, 2014)

c) Grabado en madera con láser CO2

El grabado con láser puede presentarse de varias formas: carbonización, aclaración o cambio de color, cambio físico del acabado de la superficie del material (se marca el material debido a un cambio de reflectividad en la superficie), vaporización (cuando el material de la superficie es removido Debido a una fuente de calor muy intensa), derretimiento y soplado (cuando se calienta la superficie a su punto de fusión y con la ayuda de un gas se extraen los residuos derretidos permitiendo que el calor del láser sea aprovechado en la superficie. (Vallejo, 2007)

En la aplicación Lasersaur App con la que se pretende realizar el controlador, es factible realizar un grabado por vectores.

- **Grabado por vectores.**

El grabado por vectores es un método para marcar o anotar una superficie del material. Al igual que el proceso de corte por láser, este seguirá el camino de trazos vectoriales sin cortar todo el camino. La anchura de la carrera se realiza en la entalladura del láser es decir, aproximadamente 0,2mm. Para grabar trazos más gruesos, se tendría que enfocar más el láser (Hechenberger, lasersaur, 2014).

En la figura 1.27 se muestra una imagen grabada utilizando grabado por vectores.



Figura 1.27 Grabado por vectores sobre madera.

Fuente: (Hechenberger, 2014)

- **Velocidad y potencia.**

“Lo más aconsejable para el grabado es seleccionar el 100% de la potencia y ajustar la velocidad para obtener la profundidad deseada.” (EPILOG)

- **Ajustes de resolución**

“Escogiendo 300 DPI (DPI=dots per inch= puntos por pulgada) el resultado es bastante bueno, pero lo realmente excelente es escoger 600 DPI.” (EPILOG)

- **Escalas grises**

“Estas escalas quedan muy bien cuando se hace grabado en madera, debido a que la madera según el tipo de gris reacciona diferente y produce contrastes muy vistosos.” (EPILOG)

2.4.3 Ventajas de una máquina CNC para corte y grabado con láser CO2.

- No genera desechos de virutas, por lo tanto no es necesario limpiar el entorno de la máquina
- Corte láser de contornos finos.
- Mecanizado sin contacto, por lo tanto sin carga o daño del material y sin necesidad de tensarlo
- Corte y grabado láser de diferentes grosores de material y combinaciones en una fase de trabajo

- Grabado de relieves (EUROLASER)
- En el tratamiento con láser de la madera no se producen astillas. (TROTEC, 2014)
- Los grabados son permanentes, no se borran con el tiempo.
- Puede trabajar sobre una variedad amplia de materiales. (Castro, 2010)

2.4.4 Tipos de madera adecuados para el grabado y corte con láser.

- Chapa de madera
- Madera noble
- MDF
- Madera de haya
- Madera de balsa
- Madera natural
- Madera de cedro
- Madera de aliso
- Madera auténtica
- Madera maciza (TROTEC, 2014)

2.4.5 Aplicaciones de corte y grabado con láser CO2

“Son óptimas para el grabado y el corte con láser de madera, por ejemplo para juguetes, artículos de decoración, artesanías, moldes, adornos navideños, artículos de regalo, maquetas arquitectónicas y marquetería.” (TROTEC, 2014)



Figura 1.28 Grabado en madera.

Fuente: (TROTEC, 2014)

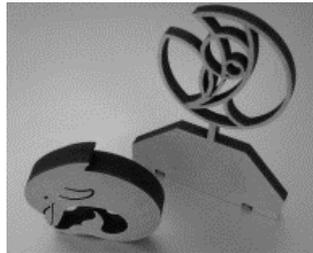


Figura 1.29 Corte de piezas decorativas en madera.

Fuente: (SERVICIOS GRÁFICOS BRIVIESCA, 2010)

Están siendo implantados en los más diversos campos de producción, y la constante aparición de nuevos materiales en el mercado no hace sino ampliar los mercados potenciales, estos son algunos de ellos:

- Rótulos
- Silueteado de Impresiones en rígidos
- Mecanizado en metales ligeros
- Mecanizado de plásticos
- Carpintería en madera y fenólicos
- Carpintería de aluminio
- Carpintería de resinas sintéticas
- Grabado artístico en mármol
- Creación de moldes
- Reproducciones artísticas
- Creación de expositores y displays
- Decoración de interiores
- Decoración de fachadas (SERVICIOS GRÁFICOS BRIVIESCA, 2010)



Figura 1.30 Rótulo en relieve en derivado de madera (MDF).

Fuente: (SERVICIOS GRÁFICOS BRIVIESCA, 2010)

CAPÍTULO II

DISEÑO

4.1 Introducción

Para el diseño del sistema se establecen parámetros y condiciones que ayudarán al desarrollo del proyecto los cuales se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de la máquina.

PARÁMETRO	VALOR
Potencia láser	80 [W]
Área de trabajo	1180 x 900 [mm]
Velocidad máxima	6000 [mm/min]
Resolución	< 0.1 [mm]
Alimentación	110Vca

Una de las condiciones más importantes es la potencia del tubo láser sellado de CO₂, una vez analizada la tabla 1.5 donde se muestra registros de espesores de madera cortados con diferentes valores de potencia se obtuvo un promedio de aproximadamente 70 Watts para un espesor mayor a 5mm. En el mercado se dispone de un tubo láser de 80 Watts por lo cual se elige este valor como la máxima potencia del presente sistema de corte y grabado.

4.2 Diseño mecánico

Se realiza un esquema general del sistema basado en diferentes máquinas CNC ya existentes con un tipo de estructura cartesiana con movimiento bidimensional (Ver figura 2.1).

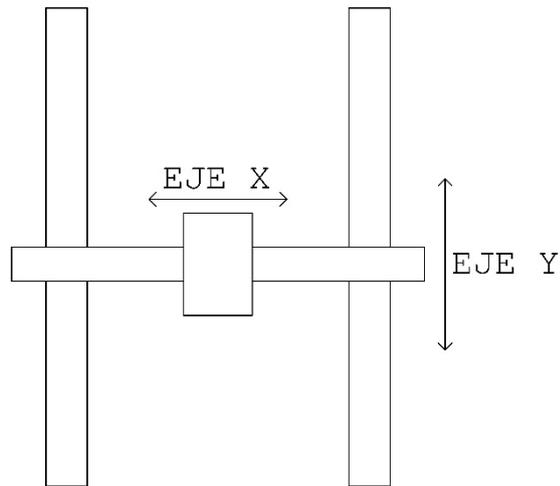


Figura 2.1 Esquema general.

4.2.1 Eje X.

a) Cabezal Láser.

Para iniciar con el diseño del eje X se consideró la forma física del cabezal de corte que consta de las siguientes partes (Ver figura 2.2 y 2.3):



Figura 2.2 Partes cabezal láser.

(1) Boquilla láser. (2) Soporte lente. (3) Acople (4) Soporte espejo 45 grados.



Figura 2.3 Cabezal Láser.

A fin de direccionar el haz del láser se utilizan soportes de espejos en cada uno de los ejes como se muestra en la figura 2.4.

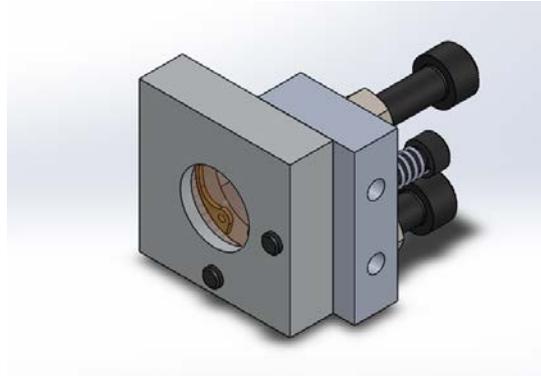


Figura 2.4 Cabezal Láser.

Para la regulación de altura de corte y/o grabado de la madera se modifica el cabezal de la figura 2.3 consiguiendo un cabezal telescópico como se muestra en la figura 2.5, junto con el soporte para el espejo (detalles ver en el anexo E).

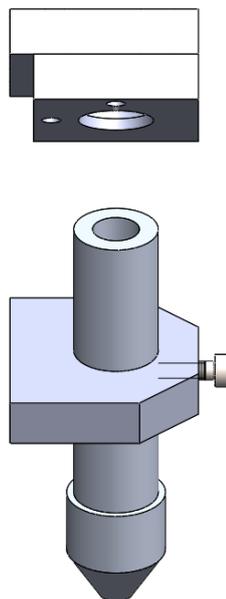


Figura 2.5 Cabezal láser telescópico.

b) Guía lineal y carro del eje X.

Continuando con el diseño del carro que se desplazará sobre el eje X se requiere un tubo cuadrado como guía lineal (figura 2.6). Gracias a que el perfil a utilizar está fabricado de aluminio extruido, la superficie sobre el cual se deslizará el carro es lisa

y recta evitando así procesos de rectificación que fueran necesarios en otro tipo de perfiles.

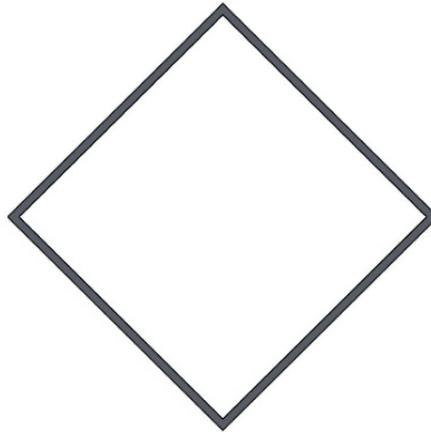


Figura 2.6 guía lineal eje X.

Con el perfil preestablecido se diseña el carro que se moverá sobre este. Las ruedas que permitirán el movimiento del carro X se observa a continuación en la figura 2.7 junto con el ensamble de la misma en la figura 2.8.

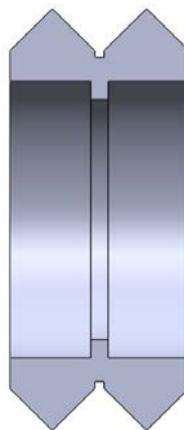


Figura 2.7 Ruedas carro X.

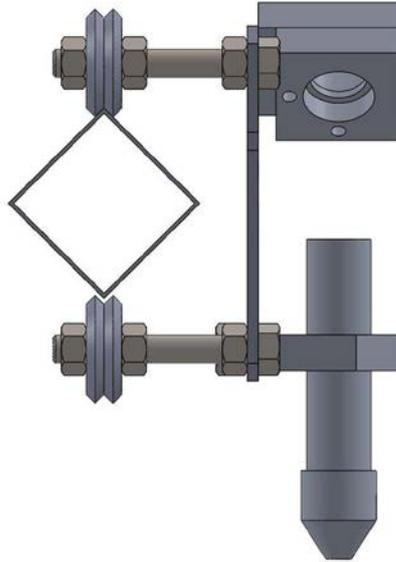


Figura 2.8 Ensamble Ruedas-Guía Lineal.

Estas ruedas utilizan los siguientes rodamientos (Ver figura 2.9).



Figura 2.9 Rodamientos RM2-2RS 1013.

Únicamente debe existir un grado de libertad entre el eje guía y el carro por lo que las ruedas se ubican en una posición que satisfagan la siguientes ecuaciones.

$$\sum F_x = ma_p \quad \text{Ecuación 2.1 Tercera ley de newton.}$$

$$\sum M_p = 0 \quad \text{Ecuación 2.2 Equilibrio (Momento)}$$

$M_p = \text{Momento en } P$ (P hace referencia a un lugar fijo sobre el carro X)

Una configuración geométrica que satisface esta ecuación es:

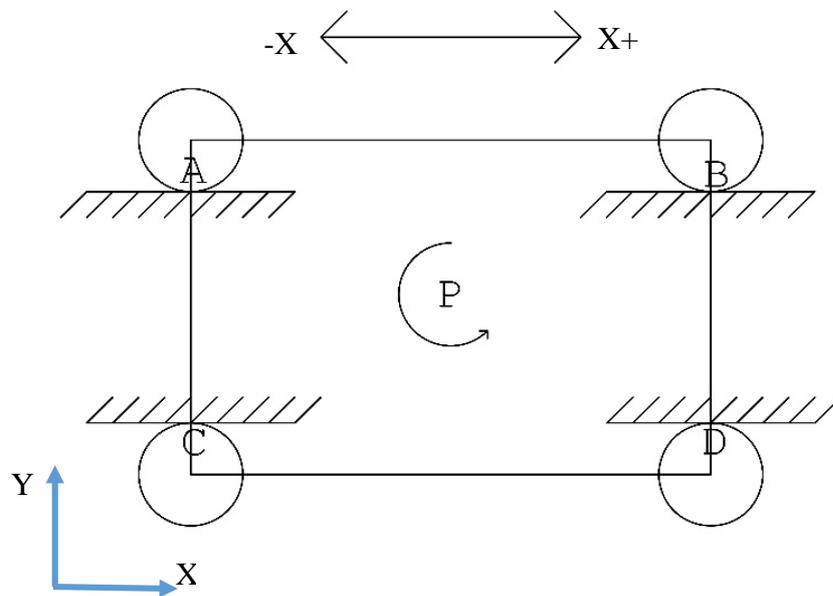


Figura 2.10 Grado de libertad en el carro del eje X.

De la ecuación 2.2 se tiene que:

$$\sum M_P = 0$$

$$\vec{R}_A \times \vec{D}_{PA} + \vec{R}_B \times \vec{D}_{PB} + \vec{R}_C \times \vec{D}_{PC} + \vec{R}_D \times \vec{D}_{PD} = 0$$

Planteada la sumatoria de momentos en el punto P se establece que el carro únicamente se moverá a lo largo del eje lineal manteniendo su trayectoria, en el caso que existieren fuerzas no paralelas al eje x no será posible el movimiento.

$$\vec{R}_A = \text{Reaccion en A}$$

$$\vec{R}_B = \text{Reaccion en B}$$

$$\vec{R}_C = \text{Reaccion en C}$$

$$\vec{R}_D = \text{Reaccion en D}$$

$$\vec{D}_{PA} = \text{Vector posición de P a A}$$

$$\vec{D}_{PB} = \text{Vector posición de P a B}$$

$\overrightarrow{D_{PC}}$ = Vector posición de P a C

$\overrightarrow{D_{PD}}$ = Vector posición de P a D

El diseño del soporte del cabezal se muestra en la figura 2.11, los agujeros que se observa en este servirán como sujeción de los finales de carrera y de la correa dentada.

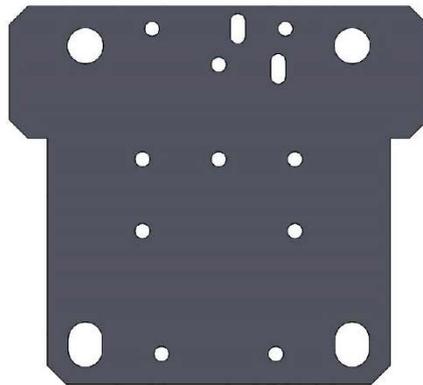


Figura 2.11 Geometría base del carro del EjeX.

A continuación se muestra el ensamble general del carro X.

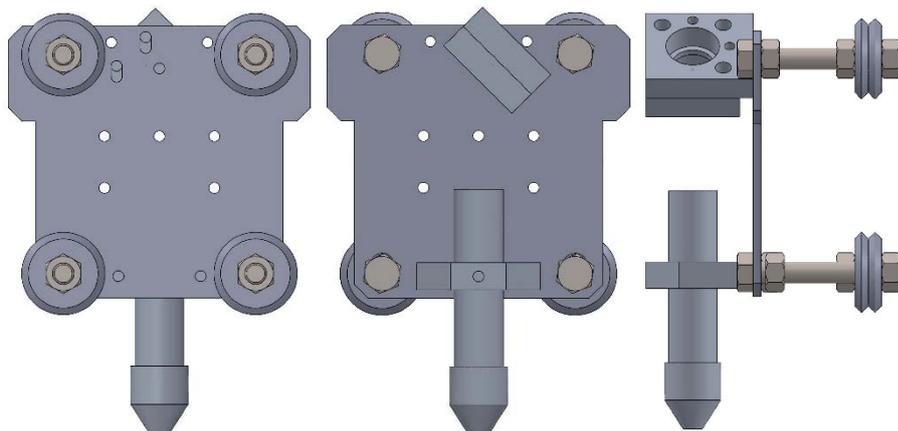


Figura 2.12 Vista Frontal, posterior y lateral del ensamble del carro X.

En la figura 2.13 se muestra el carro del eje X sobre la guía lineal.

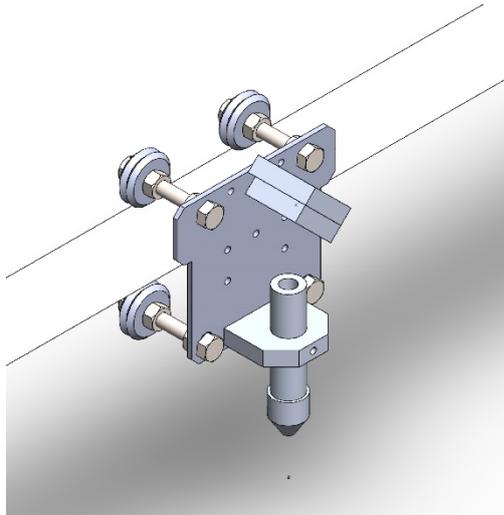


Figura 2.13 Ensamble carro-guía del eje X.

a) Análisis en rodamientos.

Para determinar los esfuerzos en los rodamientos se obtiene las reacciones en los apoyos.

$$Masa\ total = 0.2kg$$

De donde se tiene que la fuerza de reacción para cada uno es:

$$\sum F_x = 0$$

Ecuación 2.3 Equilibrio (Fuerzas)

$$F_{rA} = F_{rB}$$

$$F_{rA} = \frac{0.3Kg}{2} \times 9.81$$

$$F_{rA} = 2N$$

Referenciándonos en las especificaciones del rodamiento 1013 2RS del anexo F se tiene que:

$$Carga\ Nominal = 8260N$$

$$F_s = \frac{8260N}{2N} = 4130$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos, se procederá a la construcción utilizando los rodamientos 1013 2RS pues el factor de seguridad es más de 100.

b) Análisis en el eje X.

Para el análisis de la guía se considera como una viga simplemente apoyada como se muestra en la figura 2.14.

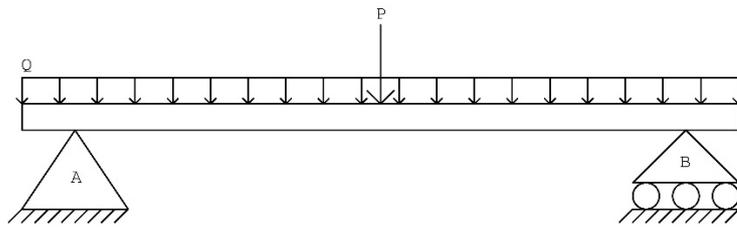


Figura 2.14 Esquema viga simplemente apoyada.

Para realizar el análisis de la guía que soporta el carro X se inicia con las ecuaciones de equilibrio.

$$\sum F_x = 0$$

$$\vec{R}_A + \vec{R}_B - (P + Q) = 0 \quad \text{Ecuación 2.4 Reacciones en los apoyos del eje X}$$

$$P + Q = \text{Peso del carro X} + \text{peso de la guía}$$

$$\vec{R}_A = \text{Reaccion en A}$$

$$\vec{R}_B = \text{Reaccion en B}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$\vec{P}x \frac{\vec{L}}{2} + \vec{R}_B x \vec{L} = 0 \quad \text{Ecuación 2.5 Momentos en el punto A del eje X}$$

$$L = \text{Longitud de la guía}$$

Reemplazado los siguientes valores en las ecuaciones 2.4 y 2.5 e igualando se tiene que:

$$L = 1,3m$$

$$P + Q = 60N$$

$$\vec{R}_A = \vec{R}_B = 30N$$

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector se muestran a continuación (Ver figura 2.15).

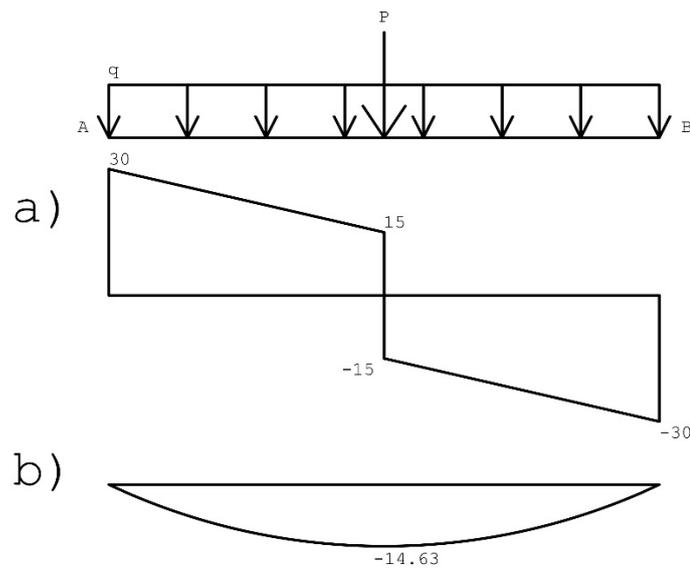


Figura 2.15 Fuerza cortante máxima [N] (a) Momento flector máximo [Nm] (b).

La inercia se obtiene en base al perfil de la guía (figura 2.16) con respecto al eje X (anexo E).

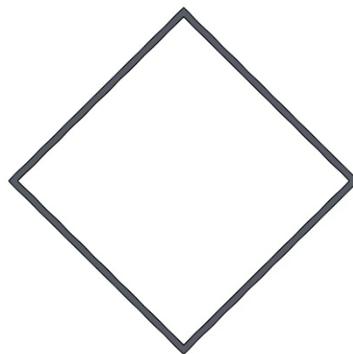


Figura 2.16 Esquema perfil guía del carro X.

$$I_{xx} = 4.28cm^4$$

Se identifica cual es el momento de inercia mínimo necesario para un factor de seguridad de 2 aplicando la teoría del esfuerzo normal máximo:

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad \text{Ecuación 2.6 Teoría esfuerzo normal máximo.}$$

$$\sigma = \frac{M_{max}C}{I} \quad \text{Ecuación 2.7 Esfuerzo flector.}$$

El esfuerzo de cedencia y el esfuerzo último del aluminio son (Ver anexo H):

$$S_u = 69 \text{ Mpa}$$

$$S_y = 28 \text{ Mpa}$$

Reemplazando en la ecuación 2.6 y 2.7.

$$\sigma = \frac{M_{max}C}{I}$$

$$\sigma_{max} = \frac{14.63Nm \times 0.020m}{I}$$

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

$$2 = \frac{28Mpa}{\sigma_{max}}$$

$$I = 2.09 \text{ cm}^4$$

Para calcular el desplazamiento producto de la carga aplicada se utiliza la siguiente ecuación.

$$y = \frac{-PL^3}{48EI} \quad \text{Ecuación 2.8 Deflexión en vigas con carga en la mitad.}$$

$$y = \frac{-5WL^3}{348EI} \quad \text{Ecuación 2.9 Deflexión en vigas con carga distribuida.}$$

Al sumar y reemplazar los valores se tiene que:

$$y_{max} = \frac{-PL^3}{48EI} + \frac{-5WL^3}{348EI}$$

$$y_{max} = \frac{L^3}{EI} \left[-\frac{P}{48} - \frac{W5}{348} \right]$$

$$y_{max} = \frac{(1.3m)^3}{(69Gpa)(4.28 \times 10^{-8} m^4)} \left[-\frac{30}{48} - \frac{58}{348} \right]$$

$$y_{max} = 0.47mm$$

Como se observan el momento de inercia de la viga a utilizar es mayor al necesario $4.28 \text{ cm}^4 \gg 2.09 \text{ cm}^4$ y la máxima deflexión no representa un valor exagerado utilizando así el mismo perfil como guía.

Con ayuda del programa Solidworks se aseguró los cálculos realizados (ver figura 2.17 y 2.18)

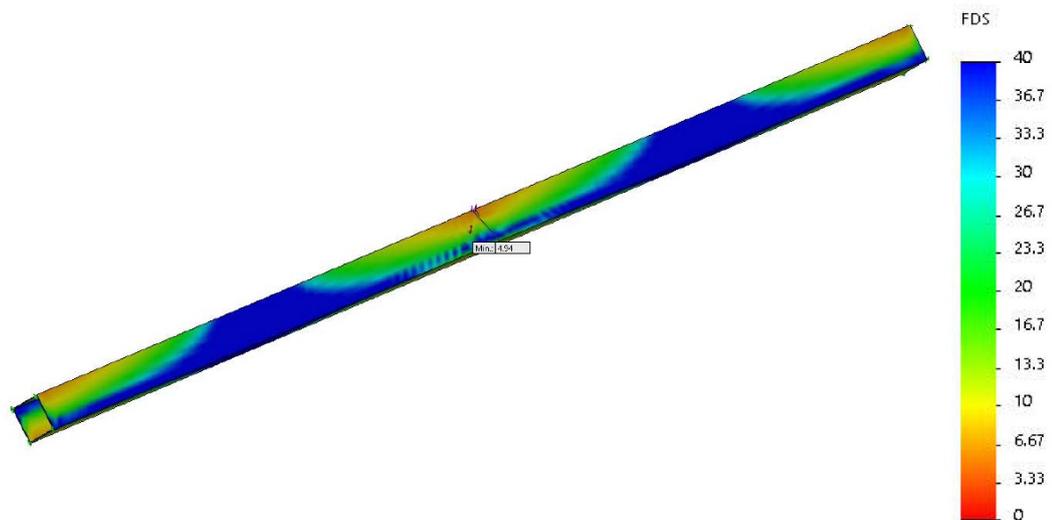


Figura 2.17 Factor de seguridad mínimo (≥ 3)

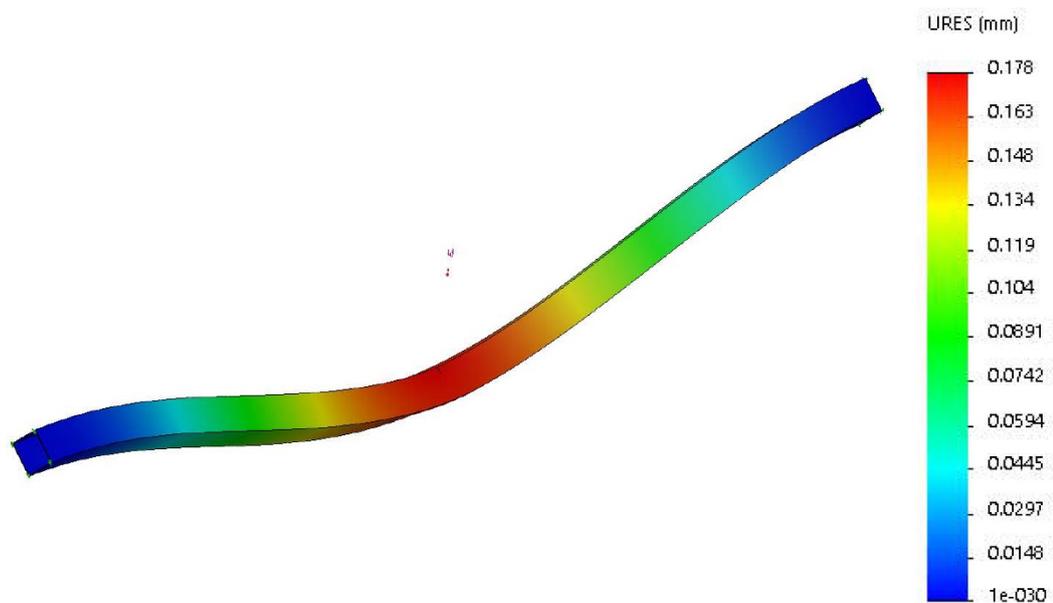


Figura 2.18 Desplazamiento Máximo ($\leq 0.3mm$)

Los soportes laterales que se moverán sobre las guías lineales del eje Y se pueden apreciar en la figura 2.19.

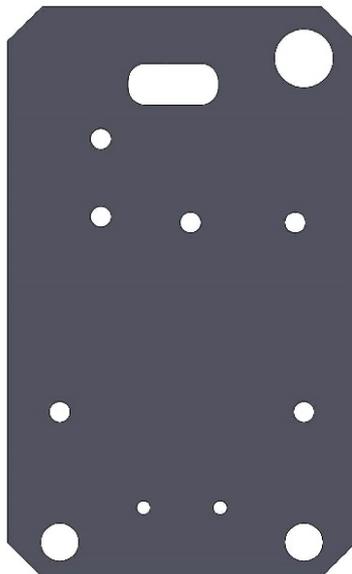


Figura 2.19 Soportes laterales Eje X.

4.2.2 Eje Y.

El diseño de las guías lineales correspondientes al eje “Y” se lo puede observar en la figura 2.20.

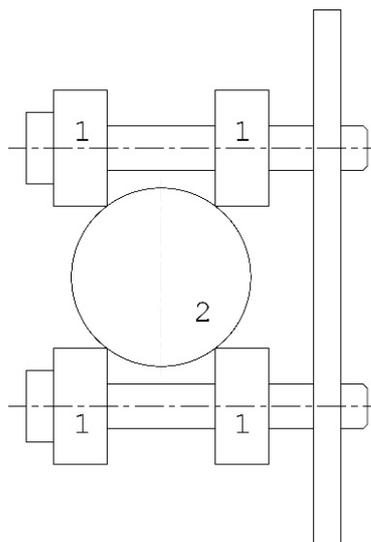


Figura 2.20 Rodamientos (1) Eje (2).

a) Análisis del Eje (2)

Para la selección del eje se lo considero como una viga simplemente apoyada, como se muestra en la figura 2.21.

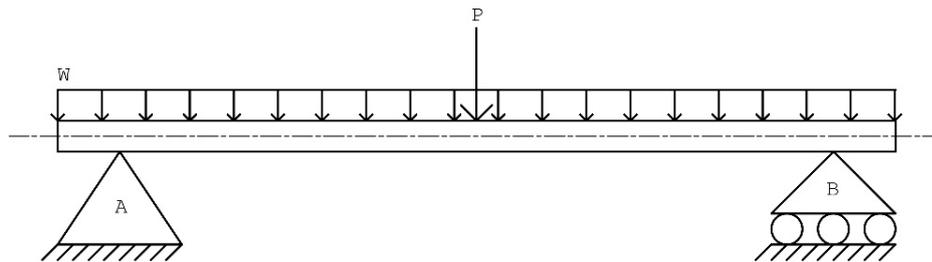


Figura 2.21 Esquema del eje para guía en Y.

P representara la suma de los pesos, tanto del motor del eje X, el carro del eje X y la guía lineal del eje X, más un peso adicional para tubería neumática y otros.

$$P = P_{motor\ x} + P_{guia\ x/2} + P_{carro\ x} + P_{soportes\ eje\ x} + P_{extra}$$

$$P = \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (1Kg + 2Kg + 2Kg + 1Kg + 0.5Kg)$$

$$P = 65N$$

W representa el peso de la guía del eje Y.

$$W = 32N$$

Determinando las reacciones en los apoyos se tiene que:

$$\vec{R}_A = \vec{R}_B = 48.5N$$

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector se muestran a continuación (Figura 2.22).

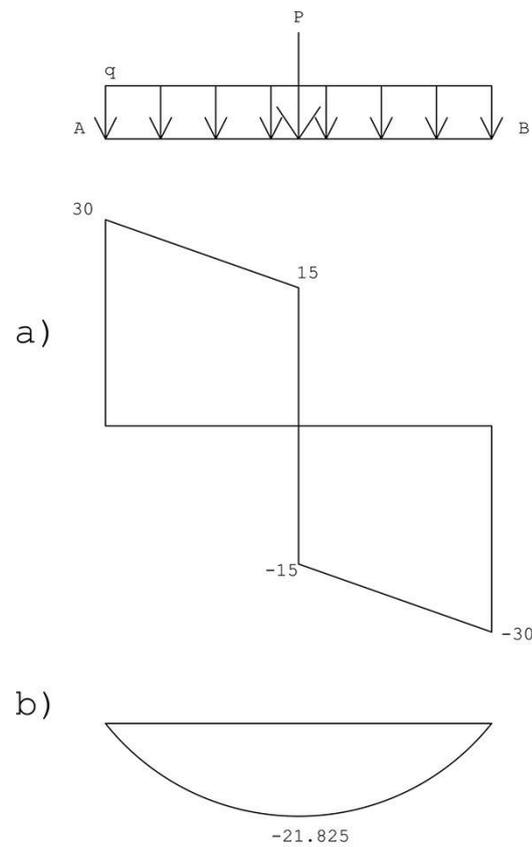


Figura 2.22 Fuerza cortante máxima [N] (a) Momento flector máximo [Nm] (b).

La inercia del eje con el que decidió realizar el diseño se muestra en la figura 2.23 de donde la inercia del mismo es:

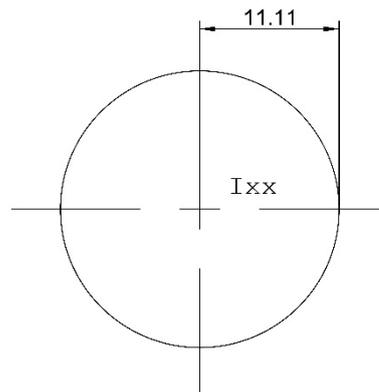


Figura 2.23 Esquema perfil guía del eje Y.

$$I_{xx} = \frac{\pi r^4}{4}$$

Ecuación 2.10 Inercia de una Circunferencia.

$$I_{xx} = 1.2 \text{ cm}^4$$

De igual forma se identifica el momento de inercia mínimo necesario para un factor de seguridad de 2 con la ecuación 2.6 y 2.7:

$$\sigma = \frac{M_{\max} C}{I}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{21.82 \text{ Nm} \times C}{I}$$

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{\max}}$$

$$2 = \frac{470 \text{ Mpa}}{\sigma_{\max}}$$

$$I = 9.28 \times 10^{-8} C$$

De donde $C = 0.011 \text{ m}$

$$I = 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Para calcular el desplazamiento producto de la carga aplicada se utiliza la ecuación 2.8 y 2.9.

Al sumar y reemplazar los valores se tiene que:

$$y_{\max} = \frac{-PL^3}{48EI} + \frac{-5PL^3}{348EI}$$

$$y_{\max} = \frac{L^3}{EI} \left[-\frac{P}{48} - \frac{W5}{348} \right]$$

$$y_{\max} = \frac{(0.9 \text{ m})^3}{(205 \text{ Gpa})(1.2 \times 10^{-8} \text{ m}^4)} \left[-\frac{65}{48} - \frac{160}{348} \right]$$

$$y_{\max} = 0.5 \text{ mm}$$

Para el perfil de guía del eje Y se obtuvo un momento de inercia (1.2 cm^4), mucho mayor al necesario (0.102 cm^4) y la máxima deflexión de 0.5 mm se puede despreciar, justificando así utilizar las dimensiones de este perfil como guía.

Con ayuda del programa Solidworks se aseguró los cálculos realizados (ver figura 2.24 y 2.25).

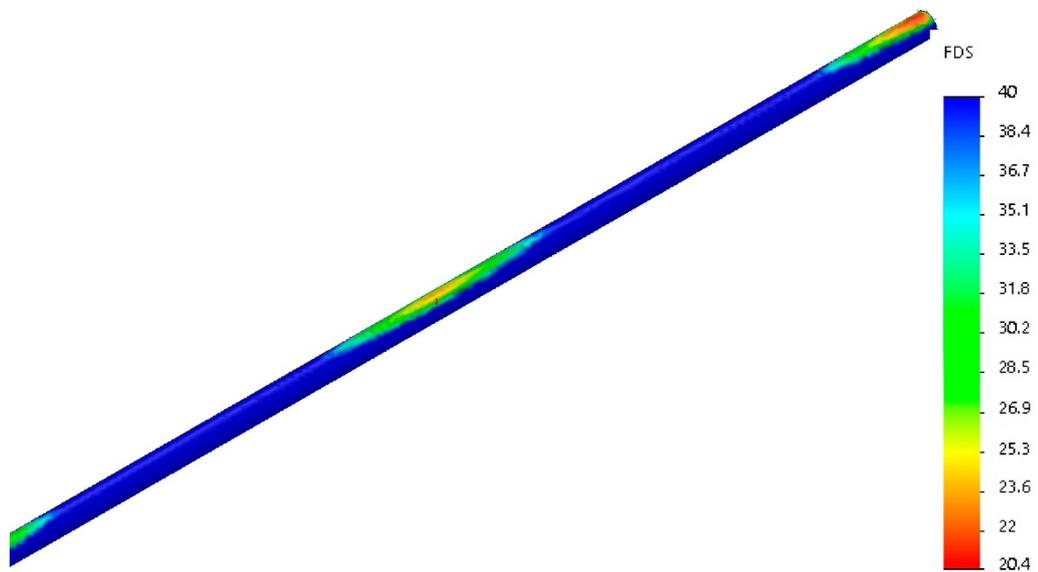


Figura 2.24 Factor de seguridad mínimo (≥ 21)

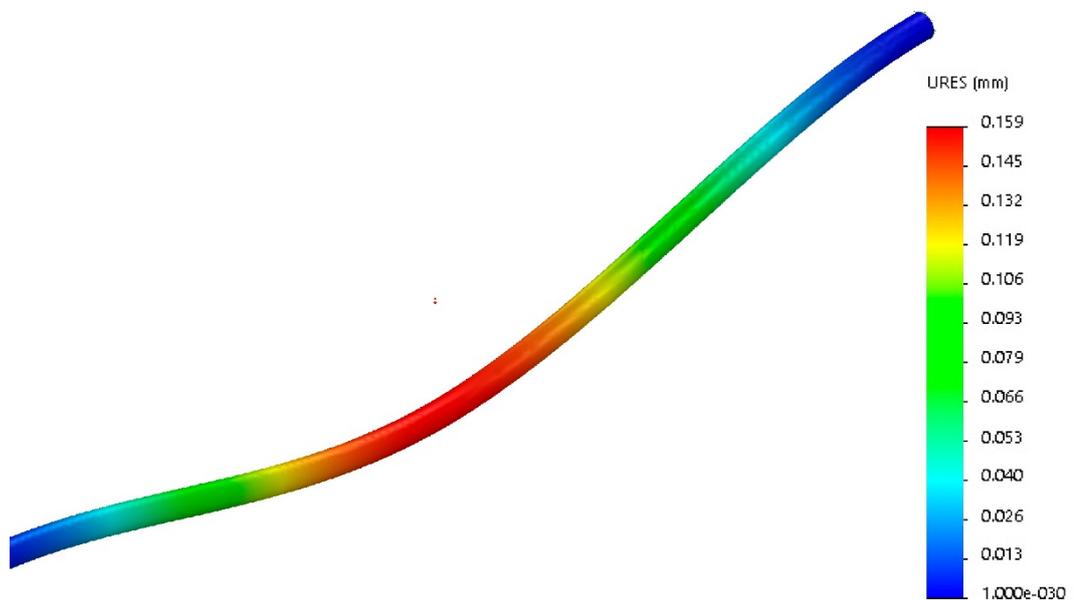


Figura 2.25 Desplazamiento Máximo ($\leq 0.2\text{mm}$)

4.2.3 Diseño general del sistema de movimiento.

En las siguientes figuras se puede observar los soportes con los motores y poleas tensoras que transmitirán el movimiento en el eje X (Figura 2.26 y 2.27).

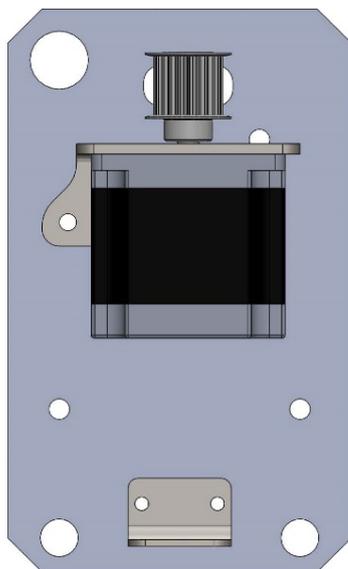


Figura 2.26 Soporte lateral eje X (Motor).

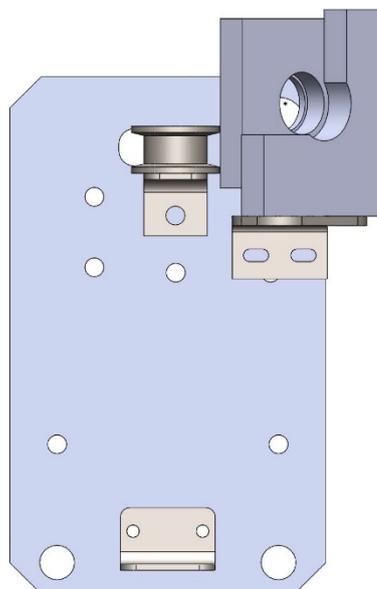


Figura 2.27 Soporte lateral eje X (Espejo, polea tensora).

Las figuras 2.28 y 2.29, sirven como soportes para los motores, chumaceras y eje de transmisión de movimiento al eje Y.

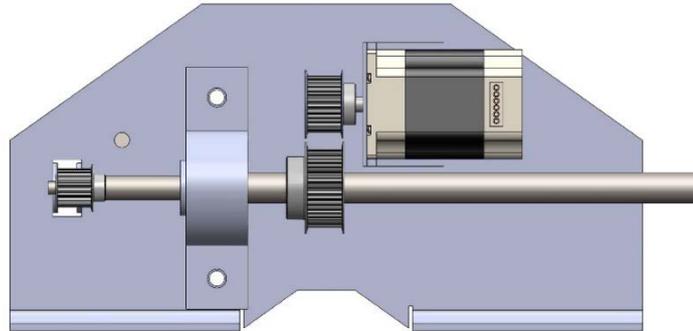


Figura 2.28 Soporte trasero Y (Motor-Eje).

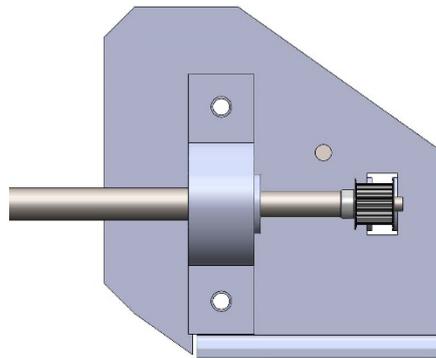


Figura 2.29 Soporte trasero Y (Chumacera-Eje.)

El ensamble total del eje X, y del eje Y se puede apreciar en la figuras 2.30 y 2.31.

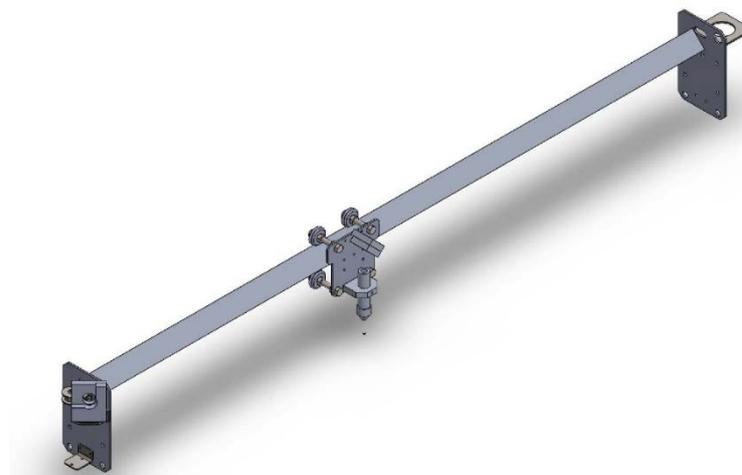


Figura 2.30 Ensamble del Eje X.



Figura 2.31 Ensamble del Eje Y.

El ensamble general del sistema de movimiento se observa en la figura 2.32 (Ver detalles en anexo E).

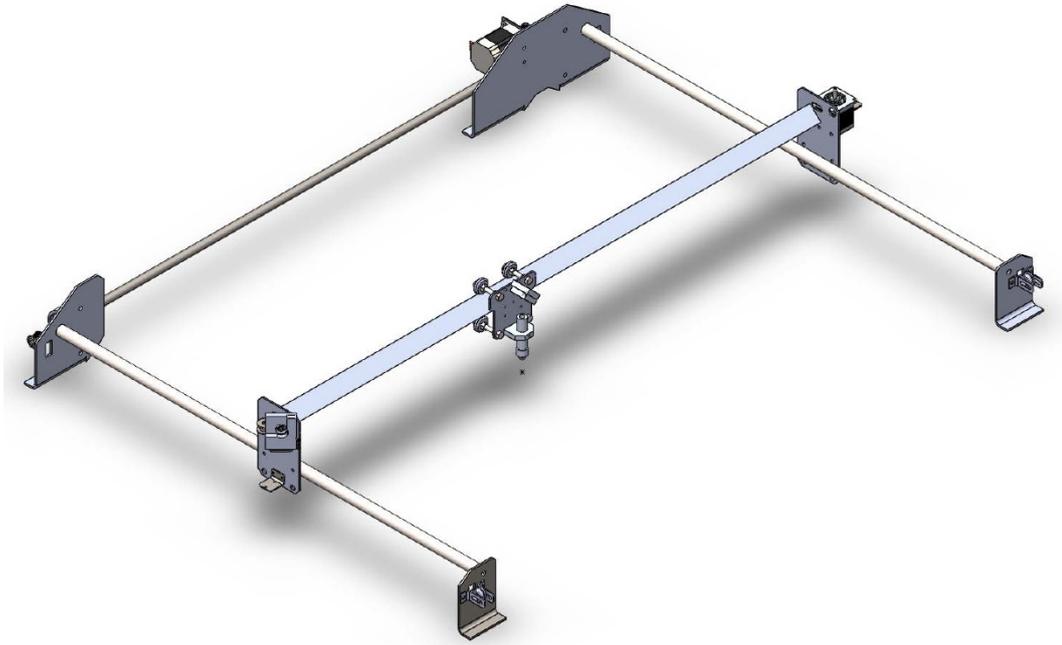


Figura 2.32 Ensamble total del sistema de movimiento.

4.2.4 Torque requerido en los motores

Para calcular el torque necesario en cada eje se considerara los datos obtenidos previamente, así como los parámetros estipulados en la tabla 2.1.

a) Torque requerido en el eje X

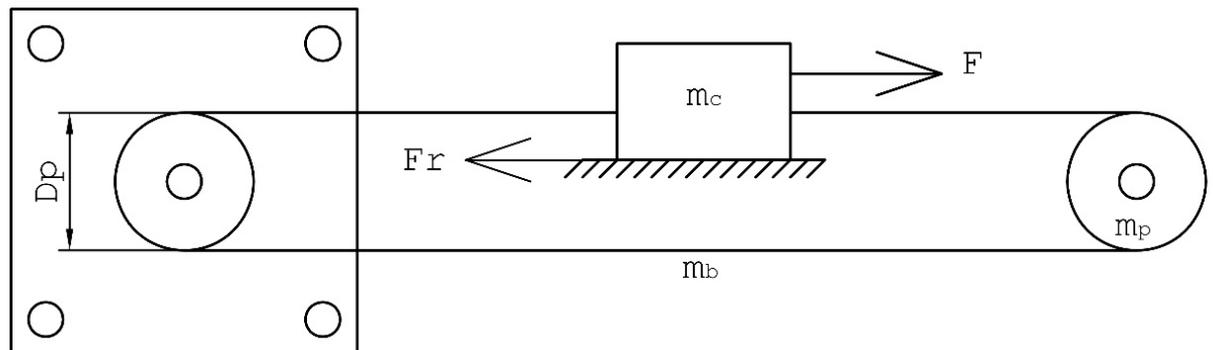


Figura 2.33 Diagrama de movimiento para el eje X.

Los datos necesarios para calcular el torque requerido en el eje X se muestra en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Condiciones de diseño para el eje X.

Velocidad Máxima [mm/min]	6000	V
Resolución [m]	0,00006	R
Masa del Carro [Kg]	3	mc
Coefficiente de fricción	0,1	uc
Diámetro de la polea [m]	0,021	Dp
Ancho de la polea [m]	0,017	L
Masa de la correa [Kg]	0,3	mb
Densidad del aluminio [Kg/m3]	2700	P

Se calcula los momentos inercia que ofrecen cada uno de los elementos que participan en el movimiento con respecto al centro del eje motriz.

$$I_{carro} = \frac{1}{4} m_c D_p^2 = \left(\frac{1}{4}\right)(3)(0,021)^2 = 0,00033075 [Kg \cdot m^2]$$

$$I_{correa} = \frac{1}{4} m_b D_p^2 = \left(\frac{1}{4}\right)(0,3)(0,021)^2 = 0,000033075 [Kg \cdot m^2]$$

$$\begin{aligned}
 I_{poleas} &= \frac{1}{16} \pi L_p D_p^4 = \left(\frac{\pi}{16}\right)(0,017)(2700)(0,021)^4 \\
 &= 1,75E - 06 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2] \\
 I_{motor} &= 0,000028 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]
 \end{aligned}$$

La aceleración deseada expresada en $\frac{rad}{s^2}$ es:

$$\alpha = 2 \frac{a_r}{D_p} = 2 \frac{2}{0,021} = 190,4761905 \left[\frac{rad}{s^2}\right]$$

Para lograr la aceleración deseada se deberá vencer la inercia ofrecida por cada uno de los elementos, de donde el torque necesario para acelerar será:

$$\begin{aligned}
 T_{acelerar} &= (I_{correa} + I_{poleas} + I_{motor} + I_{carro}) \cdot \alpha \\
 &= (0,000033075 + 1,75E - 06 + 0,000028 + 0,00033075) \cdot 190,47 \\
 &= 0,07496719 \text{ [Nm]}
 \end{aligned}$$

Además se considera la fuerza a vencer generada por el coeficiente de rozamiento.

$$T_{friccion} = D_p \frac{g \cdot m_c \cdot u_c}{2} = 0,021 \frac{(9,81)(3)(0,1)}{2} = 0,0309015 \text{ [Nm]}$$

De donde el torque necesario del motor del eje X será de:

$$\begin{aligned}
 T_{requerido} &= F_s (T_{acelerar} + T_{friccion}) \\
 T_{requerido} &= 1,5 (0,07496719 + 0,0309015) \\
 T_{requerido} &= 0,158803035
 \end{aligned}$$

b) Torque requerido en el eje Y

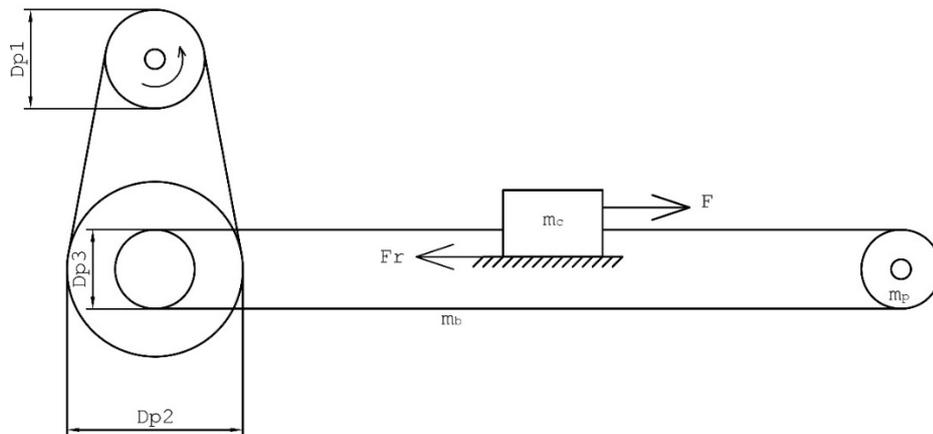


Figura 2.34 Diagrama movimiento para el eje Y.

Los datos necesarios para calcular el torque requerido en el eje Y se muestra en la tabla 2.3:

Tabla 2.3 Condiciones de diseño para el eje Y.

Velocidad Máxima [mm/min]	6000	V
Resolución [m]	0,00006	R
Masa del Carro [Kg]	10	mc
Coefficiente de fricción	0,1	uc
Diámetro de la polea 1 [m]	0,031	Dp1
Diámetro de la polea 2 [m]	0,040	Dp2
Diámetro de la polea 3 [m]	0,021	Dp3
Ancho de las poleas [m]	0,017	Lp
Masa de la correa [Kg]	0,6	mb
Densidad del aluminio [Kg/m3]	2700	pal
Diámetro eje de transmisión [m]	0,022	De
Densidad del acero [Kg/m3]	7850	pac
Longitud eje de trasmisión [m]	1,4	Le

La relación de transmisión obtenida por la polea dentada 1 y 2 es:

$$i = \frac{D_{P2}}{D_{P1}} = \frac{0.040}{0.031} = 1.31$$

Se calcula los momentos inercia que ofrecen cada uno de los elementos que participan en el movimiento con respecto al centro del eje motriz.

$$I_{carro} = \frac{1}{4} m_c D_p^2 = \left(\frac{1}{4}\right)(10)(0,021)^2 = 1,10E - 03 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{correa} = \frac{1}{4} m_b D_p^2 = \left(\frac{1}{4}\right)(0,6)(0,021)^2 = 6,62E - 05 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{polea 1} = \frac{1}{16} \pi L p_{al} D_{p1}^4 = \left(\frac{4\pi}{16}\right)(0,031)(2700)(0,031)^4 \\ = 7,86E - 06 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{polea 2} = \frac{1}{16} \pi L p_{al} D_{p2}^4 = \left(\frac{4\pi}{16}\right)(0,040)(2700)(0,040)^4 \\ = 2,33E - 05 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{polea 3 \times 4} = \frac{4}{16} \pi L p_{al} D_{p3}^4 = \left(\frac{4\pi}{16}\right)(0,017)(2700)(0,021)^4 \\ = 7,02E - 06 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{eje de transmision} = \frac{4}{16} \pi L p_{ac} D_p^4 = \left(\frac{4\pi}{16}\right)(0,017)(7850)(0,022)^4 \\ = 0,0005 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{motor} = 0,000046 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

La aceleración requerida expresada en $\frac{rad}{s^2}$ es:

$$\alpha = 2 \frac{a_r}{D_p} = 2 \frac{2}{0,021} = 190,4761905 \left[\frac{rad}{s^2}\right]$$

Para lograr la aceleración deseada se deberá vencer la inercia ofrecida por cada uno de los elementos, de donde el torque necesario para acelerar será:

$$T_a = \left[\frac{(I_{correa} + I_{polea 3 \times 4} + I_{carro} + I_{eje})}{i} + I_{motor} + I_{polea 1} + I_{polea 2} \right] \cdot \alpha$$

$$T_a = \left[\frac{(6,62E-5) + (7,02E-6) + (1,10E-3) + (5E-3)}{1,31} + (4,6E - 3) + (2,3E - 5) + 7,8E - 6 \right] \cdot 190,5$$

$$T_a = 0,19931105 \text{ [Nm]}$$

Además se considera la fuerza a vencer generada por el coeficiente de rozamiento.

$$T_{friccion} = D_p \frac{g \cdot m_c \cdot u_c}{2i} = 0,021 \frac{(9,81)(10)(0,1)}{2(1,31)} = 0,078 \text{ [Nm]}$$

De donde el torque necesario del motor del eje Y será de:

$$T_{requerido} = FS (T_{acelerar} + T_{friccion})$$

$$T_{requerido} = 1,5 (0,2 + 0,08)$$

$$T_{requerido} = 0,42 [Nm]$$

c) Análisis del eje de transmisión

Para el análisis en el eje de transmisión se realiza un bosquejo general (ver figura 2.35) del eje con sus elementos, el dibujo a detalle se muestran en los anexos E.

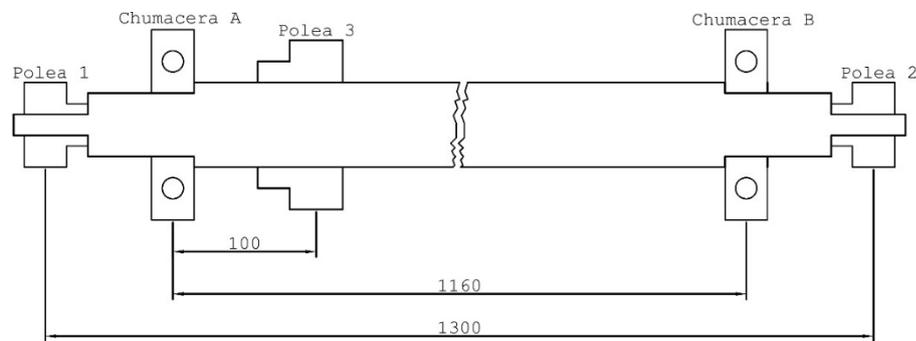


Figura 2.35 Bosquejo general eje de transmisión.

El motor transmite el movimiento a través de la polea 3 (ver figura 2.36), a continuación se determina el torque y la fuerza que actúa sobre cada uno de los elementos.

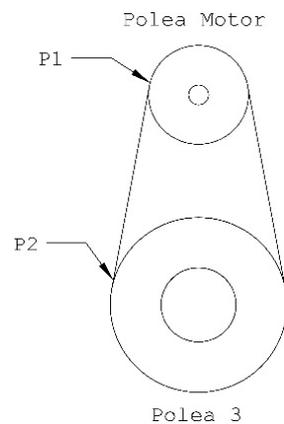


Figura 2.36 Diagrama configuración motor-eje.

$$F_{P1} = F_{P2} = \frac{T_m}{R_{pm}}$$

$$F_{P2} = \frac{0,42Nm}{0.015m}$$

$$F_{P2} = 28N$$

Se descompone esta fuerza en sus coordenadas X y Z, para su posterior análisis.

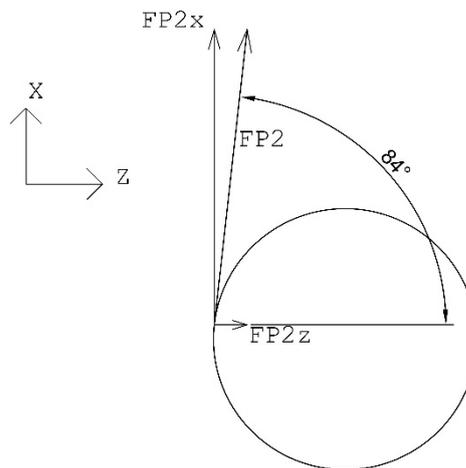


Figura 2.37 Componentes X y Z de la Fuerza FP2.

$$F_{P2X} = \text{sen}(84) \cdot 28N$$

$$F_{P2X} = 27.8N$$

$$F_{P2Z} = \text{cos}(84) \cdot 28N$$

$$F_{P2Z} = 2.92N$$

El torque ejercido sobre el eje de transmisión será:

$$T_{polea\ 3} = F_{P2} \cdot R_{polea\ 3}$$

$$T_{polea\ 3} = (28N)(0.021m)$$

$$T_{polea\ 3} = 0.58Nm$$

La transmisión del movimiento hacia la estructura que permite el movimiento en X se lo realiza a través del mismo eje con unas poleas de diámetro menor (Polea 1 y 2), donde la fuerza que se tendrá en el extremo de la misma será de:

$$F_{polea\ 1} + F_{polea\ 2} = \frac{T_{polea\ 3}}{R_{polea\ 1}}$$

$$F_{polea\ 1} = F_{polea\ 2}$$

$$F_{polea\ 1} = \frac{0.58Nm}{2 \cdot 0.011m}$$

$$F_{polea\ 1} = \frac{0.58Nm}{2 \cdot 0.011m}$$

$$F_{polea\ 1} = 26N$$

$$F_{polea\ 2} = 26N$$

Posteriormente se determina las reacciones en las chumaceras a partir de los diagramas de cuerpo libre para el plano XY e YZ (Figura 2.38 y 2.39).

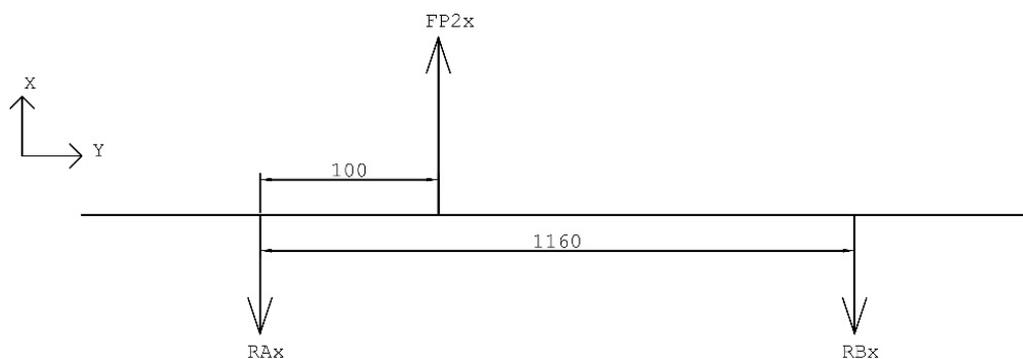


Figura 2.38 DCL Plano XZ.

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{P2X} \times 100mm - RB_X \times 1160mm = 0$$

$$27.8N \times 100 - RB_X \times 1160mm = 0$$

$$RB_X = 2.39N$$

$$\sum F_X = 0$$

$$RB_X + RA_X - 27.8N = 0$$

$$2.39N + RA_X = 27.8N$$

$$RA_X = 25.4N$$

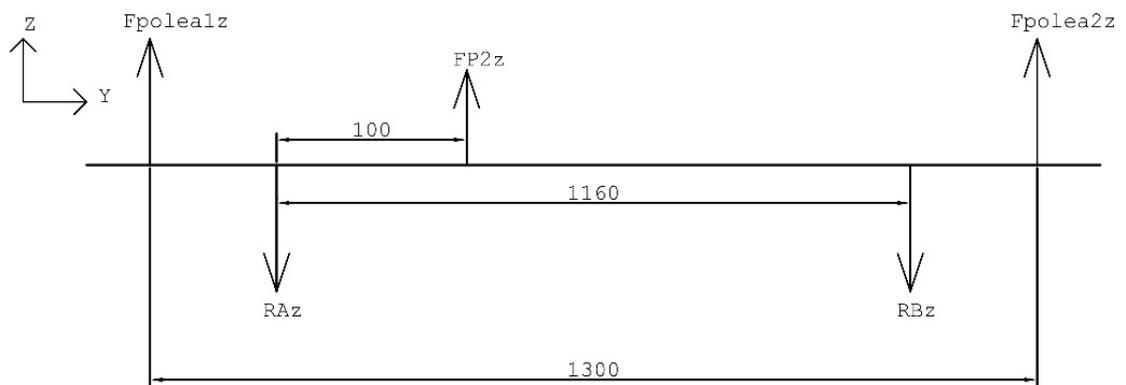


Figura 2.39 DCL Plano YZ.

$$\sum M_A = 0$$

$$-F_{polea1} \times 70mm + F_{P2z} \times 100mm - RB_z \times 1160mm + F_{polea2} \times 1230mm = 0$$

$$-26N \times 70mm + 2.92N \times 100mm - RB_z \times 1160mm + 26 \times 1230mm = 0$$

$$RB_z = 26.25N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$RB_z + RA_z - 54.92N = 0$$

$$26.25N + RA_z = 54.92N$$

$$RA_z = 28.67N$$

Los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores para cada uno de los planos se presentan seguidamente:

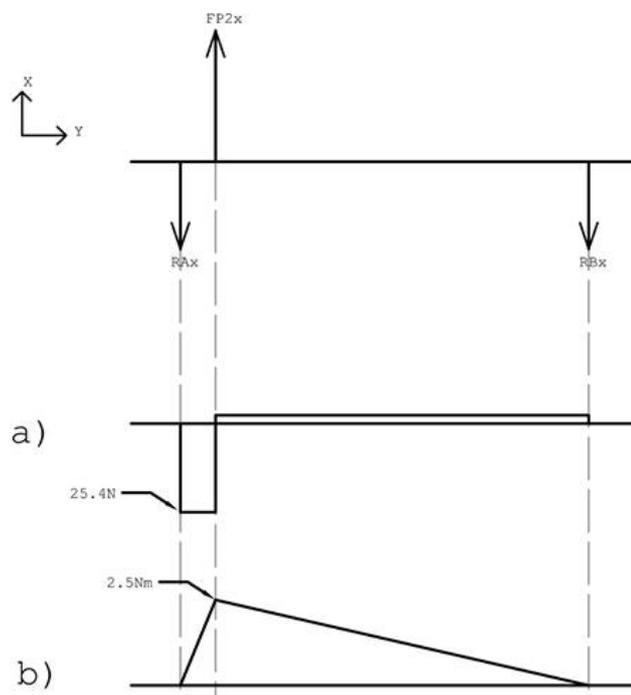


Figura 2.40 Esfuerzo cortante(a) y momento flector(b) en el plano XY.

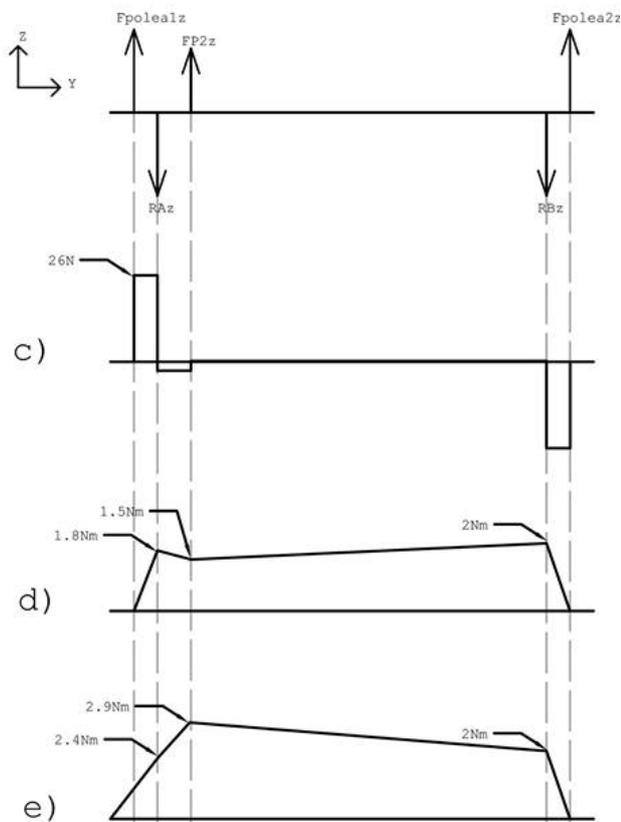


Figura 2.41 Esfuerzo cortante(c), momento flector(d) en el plano XY, y momento total (e).

Combinando los planos ortogonales se obtiene momentos totales (Ver figura 2.41.e) como el ejemplo que se presenta a continuación:

$$Mt = \sqrt{M_{FP2X}^2 + M_{FP2Z}^2}$$

$$Mt = \sqrt{(2.5Nm)^2 + (1.5Nm)^2} = 2.91Nm$$

En la figura 2.41.e se aprecia el máximo momento ubicado en la polea 2, cerca de este se encuentra el hombro de la chumacera, el análisis se empieza en este punto pues aquí existirá mayor concentración de esfuerzo:

$$M = 2.24Nm$$

$$T = 0.58Nm$$

Se determina el coeficiente de concentración de esfuerzos ocasionado por el hombro, en este caso se estima un radio de filete de 1mm el diámetro del eje es de 22mm de donde:

$$\frac{r}{d} = \frac{1mm}{22mm} = 0.045$$

Para 0.045 se tiene un coeficiente para flexión y torsión entre 1.5 y 2, en este caso se elige 1.9 para ambos casosG

El acero a utilizar es de transmisión 1018 con un esfuerzo último de (Ver anexo G):

$$S_u = 440 [Mpa]$$

El eje fue maquinado por lo tanto se incluye en el cálculo el factor de superficie K_a .

$$K_a = aS_u^b$$

Ecuación 2.11 Factor de Superficie K_a .

$$K_a = 4.51(440)^{-0.265}$$

$$K_a = 0.91$$

Se determina S_e (Esfuerzo modificado)

$$S_e = (440)(0.91)(0.5)$$

$$S_e = 200 \text{ [Mpa]}$$

Se utilizará el Criterio de ED-Goodman por ser conservadora e ideal para esta aplicación con un factor de seguridad igual a 2.

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2K_f M_a}{S_e} + \frac{[3(K_t T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right) \right\} \quad \text{Ecuación 2.12 Criterio de ED-Goodman.}$$

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left(\frac{2(1.9)(2.24Nm)}{200Mpa} + \frac{[3((1.9)(0.58Nm))^2]^{1/2}}{440Mpa} \right) \right\}^{1/3}$$

$$d \leq 10mm$$

El diámetro mínimo calculado del eje es de 7.81 mm, al tener cantidades de esfuerzos tan pequeñas en comparación con los esfuerzos que soporta el material, el diámetro del eje estará determinado por los diámetros de las chumaceras que se encuentran en el mercado local (19.5mm), así como el diámetro interior de las poleas dentadas (6mm).

d) Selección y configuración de los actuadores

La resolución deseada mínima tanto en el eje X como en el Y es de 0.06mm, por lo que para alcanzarla se necesita la siguiente cantidad de pasos por revolución en X e Y:

$$\#Pasos_X = \frac{Z_{p1}p}{r} = \frac{(22)3mm}{0.06 \text{ mm}} = 1100 \text{ [Pasos/Rev]}$$

$$\#Pasos_Y = \frac{Z_{p1}p}{r \cdot i} = \frac{(22)3mm}{(0.06 \text{ mm})(1.375)} = 800 \text{ [Pasos/Rev]}$$

Si trabajamos con motores de 200 pasos completos por revolución, la división para alcanzar los pasos deseados en X e Y será:

$$\text{Micropasos}_X = \frac{\#Pasos_X}{200} = \frac{1100}{200}$$

$$\text{Micropasos}_X \geq 5$$

$$\text{Micropasos}_Y = \frac{\#Pasos_Y}{200} = \frac{800}{200}$$

$$\mathbf{Micropasos}_Y = 4$$

En la mayoría de controladores de motores paso a paso está disponible la siguiente combinación de micro-pasos

Tabla 2.4 Micro pasos comunes en diferentes Drivers.

PASOS	200	400	800	1600	3200	6400	12800	256000
MICROPASOS	1	2	4	8	16	32	64	128

El valor de los micro pasos para el motor en X se establecerá en 1/8 pues es el valor más aproximado al que se obtuvo ($X > 5$)

El valor de los micro pasos para el motor en Y se establecerá en 1/4 pues que el valor exacto que se obtuvo ($Y = 4$)

El torque según la tabla 1.3 para el número de micro-pasos deseado representa al 19.51% para X y 38.27% para Y del torque total de donde el torque a paso completo de los motores para X,Y será de:

$$T_{mx} = \frac{0.16Nm}{0.1951} = 0.82Nm$$

$$T_{my} = \frac{0.42Nm}{0.3827} = 1.1Nm$$

0.82Nm para el motor en X, y 1.1Nm para el motor en Y.

Los motores que se seleccionaran serán de la marca LEADSHINE, las especificaciones de estos se presentan en la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Especificaciones Actuadores.

Eje	Modelo	Pasos/Rev.	# de Bobinas	Conexión	Corriente/fase (A)	Torque (Nm)	Controlador
X	57HS09	200	8	Paralelo	4.2	1.3	EM503
				Serie	2.1	1.3	
				Unipolar	2.8	0.9	
Y	57HS13	200	8	Paralelo	4	1.8	EM503
				Serie	2	1.8	
				Unipolar	2.8	1.3	

Para alcanzar el torque necesario se optara por realizar una conexión en paralelo en las bobinas de los motores.

4.3 Diseño eléctrico – electrónico

4.3.1 Diseño eléctrico

Para realizar el diseño eléctrico, se consideró las cargas eléctricas instaladas en la máquina así como el voltaje de operación, se detalla en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Parámetros eléctricos de la máquina.

CARGA ELECTRICA	V	P[W]	Cantidad	Ptotal [W]
Motores a Pasos	24Vdc	192	2	386
Ventilador	12Vdc	100	1	100
Bomba de Agua	12Vdc	23.8	1	23.8
Tarjeta Controladora	5Vdc	10	1	10
Fuente láser	110Vac	80	1	80
			$\sum P$	600

a) Acometida principal

Es fundamental dimensionar el cableado a utilizar en la acometida principal de la máquina, con el valor de potencia total mostrado en la tabla 2.6, se calcula la corriente a circular por el conductor.

$$I_{TOTAL} = \frac{P}{V}$$

$$I_{TOTAL} = \frac{600 [W]}{110[V]}$$

$$I_{TOTAL} = 5.45 [A]$$

Es necesario multiplicar el valor de la corriente obtenida por un factor de seguridad 2 que asegurará que no existirá pérdidas de voltaje por la distancia que pudiera existir entre la máquina y la fuente.

$$I_{TOTAL} = 5.45[A] \times 2$$

$$I_{TOTAL} = 10.9[A]$$

La corriente total del sistema es de 10.9 [A] por lo se escoge un conductor de calibre suficiente para transportar esta corriente referenciados en el anexo L el calibre 16 AWG conduce 12 [A].

b) Esquema de conexión.

Los diferentes valores de voltaje que se necesita en cada una de las cargas obligan a incorporar fuentes de energía, que conviertan el voltaje disponible en la red al necesitado por cada una.

En los subsiguientes esquemas se observa la conexión del circuito de potencia, de cada una de las diferentes cargas eléctricas que integran la máquina.

En la figura 2.42 se aprecia los dos motores (bomba y ventilador) que en su conjunto forman el enfriador o sistema de refrigeración (Chiller), estos motores se encuentran conectados en paralelo activados por un selector de 2 posiciones y alimentados por una fuente de 12Vdc.

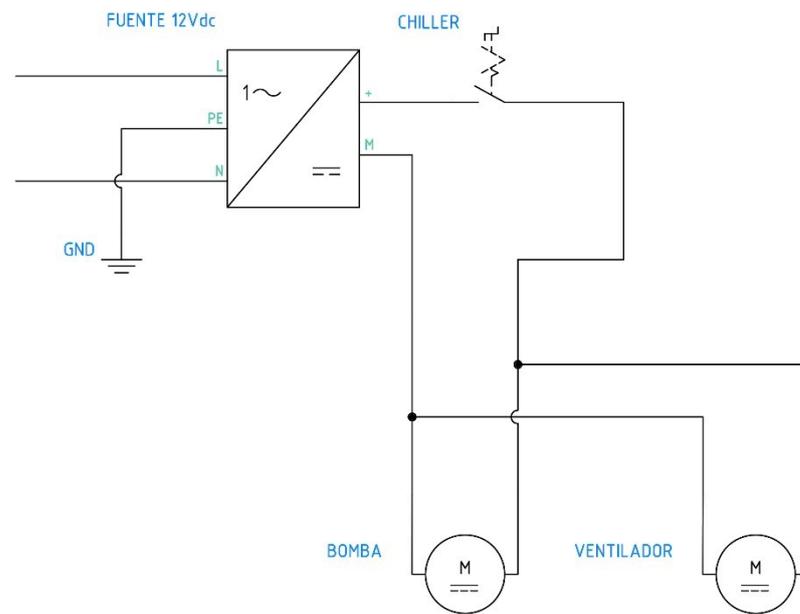


Figura 2.42 Esquema eléctrico sistema de refrigeración.

En la figura 2.43 se muestra el esquema de conexión de la fuente con el tubo láser, esta fuente proporciona un voltaje de 30KV con una corriente aproximada de 25mA, la potencia del láser se la controlara mediante PWM desde el ATmega 328p-PU (los terminales de control no se muestran en esta figura).

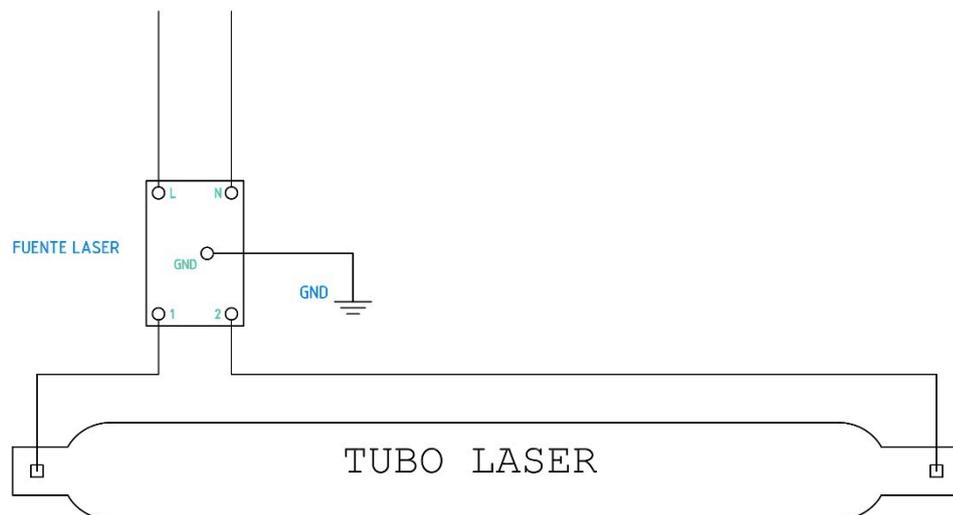


Figura 2.43 Esquema eléctrico del tubo láser.

En la figura 2.44 se puede observar los motores para el eje X e Y los motores tienen tarjetas controladoras (Ver hoja de datos en los anexos J) estas funcionan con

un voltaje de 24Vdc y los motores utilizan una corriente de 4 amperios por fase, en este esquema no se muestra los terminales de control.

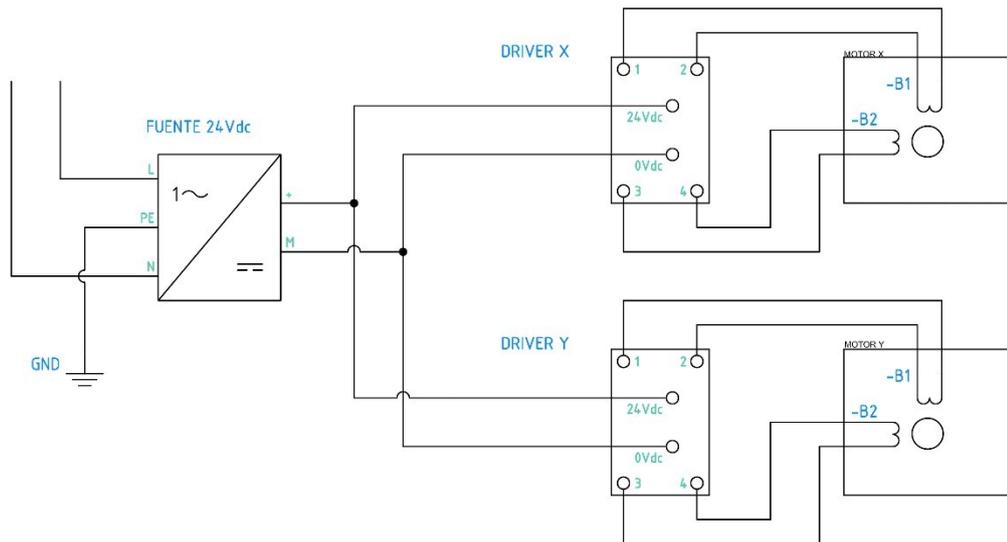


Figura 2.44 Esquema eléctrico motores a pasos.

Los motores cuentan con 8 bobinas, que al conectarlas en paralelo ofrecen el mayor torque, el detalle de la conexión se puede ver en el anexo K.

c) Dimensionamiento de cableado.

• Sistema de Refrigeración

El voltaje y la corriente de consumo de la bomba y del ventilador del radiador son:

$$I_{bomba} = 2.5 [A]$$

$$I_{ventilador} = 3 [A]$$

Por lo que:

$$I_{bomba} + I_{ventilador} = 5.5 [A]$$

El enfriador tiene un consumo de corriente bajo siendo el valor de 5.5 [A] por lo que se utilizará conductor 18 AWG.

• Motores

El voltaje y la corriente de consumo de cada fase de los motores es de:

$$I_X = 4 [A]$$

$$I_Y = 4 [A]$$

Siendo el número fases para cada motor de 2, por lo que:

$$I_{MX} = 8[A]$$

$$I_{MY} = 8[A]$$

$$I_{MT} = 8[A] + 8[A]$$

$$I_{MT} = 16[A]$$

El consumo de corriente es de 16 [A] cuando ambos motores estén accionados, al referirse al anexo L se observa que para esta cantidad de corriente el calibre indicado es de 14 AWG con una capacidad de corriente máxima de 17 [A], por lo que se utilizará este conductor para la conexión de los motores.

- **Láser**

El voltaje y la potencia de la fuente del láser es de:

$$V = 110 [Vca]$$

$$P = 80 [W]$$

Por lo que:

$$P = VI$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{80 [W]}{110 [Vca]}$$

$$I = 0.72A$$

A causa que el láser consume reducido amperaje se utilizará el mismo conductor que el enfriador a fin de conservar uniformidad.

c) Finales de carrera

Para el cableado de los elementos de control como finales de carrera se manejarán calibres 22AWG a 26 AWG, por la baja corriente que circulara por estos conductores (25mA).

4.3.2 Diseño electrónico

Para considerar el diseño electrónico se considera los pines de salida del código GRBL para el microcontrolador ATmega 328-PU modificado para una máquina láser por Stefan Hechenberger.

Los pines de se pueden ver en la figura 2.45.

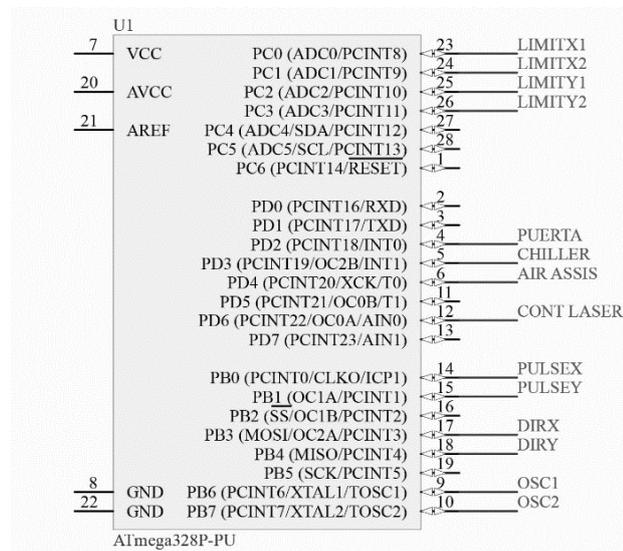


Figura 2.45 Configuración de pines Atmega 328p-PU.

a) Regulador de tensión y protección contra sobre intensidad.

El nivel lógico que utiliza este microcontrolador es de 5Vdc, energía suministrada por una fuente de PC, a continuación se muestra el esquema de protección para sobre voltaje, sobre intensidad y paro de emergencia.

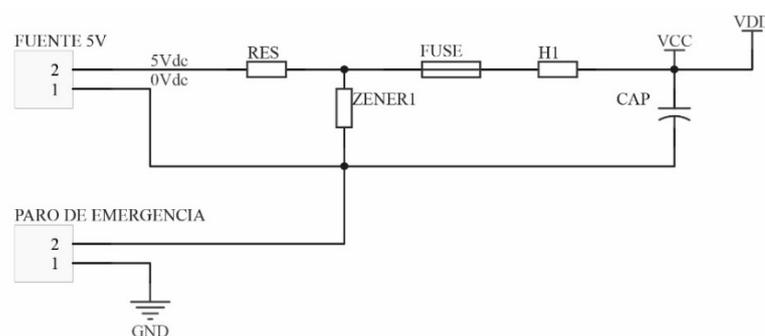


Figura 2.46.- Esquema del circuito de protección.

Los valores que tomarán los elementos serán:

El capacitor (CAP) se lo considero con el objetivo de evitar transiciones bruscas de estado que pueden ocurrir por fallas en la corriente de alimentación, el valor de este capacitor debe ser lo suficientemente capaz para almacenar energía por lo que se optó por 1000uF a 25V, a su vez este servirá como filtro del ruido generado por la

operación de los elementos electrónicos junto con la bobina H1. El valor del fusible será de 2A considerando el bajo consumo de la BBB, así como del ATmega.

Cálculo de la resistencia (RES)

El cálculo de la resistencia está determinado por la corriente requerido por carga. Esta resistencia se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$RES = \frac{Ven_{min} - Vz}{1.1 \times I_{m\acute{a}x}}$$

Dónde: **Ven (min)**: es el valor mínimo del voltaje de entrada.

IL (max): es el valor de la máxima corriente que pedirá la carga en este caso se considerara un máximo de 2A.

$$RES = \frac{5.3 - 5}{1.1 \times 2} = 0.13 [\Omega] \approx 0.1 [\Omega]$$

b) SSR.

El relé de estado sólido (SSR) que se muestra a continuación servirá como interruptor para energizar a las diferentes fuentes de energía, a su vez se desenergizaran cuando el paro de emergencia sea activado. Cabe indicar que se considerará un SSR por las diversas ventajas que tiene frente a un relé mecánico como el elevado número de ciclos de activación-desactivación, sus características se describen en la tabla 2.7.

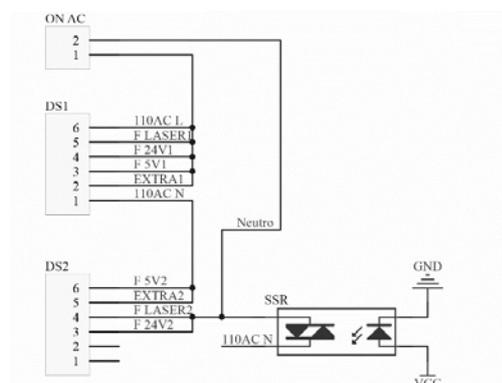


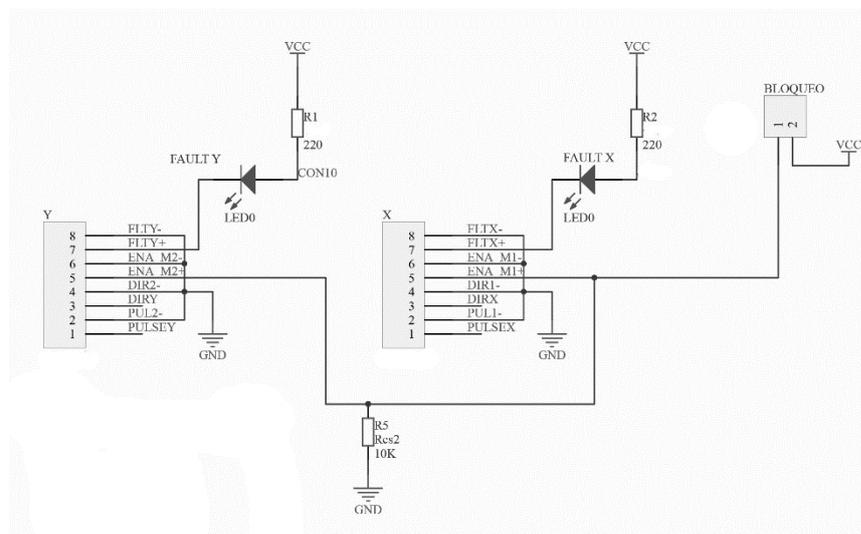
Figura 2.47 Conexión del SSR.

Tabla 2.7 Características Relé de Estado Sólido SSR-40DA

Descripción	Valor
Corriente de carga	40 [A]
Voltaje de carga	24-380 [V ac]
Voltaje de Activación	3- 32 [V dc]

c) Controladores de los motores a pasos.

Los motores a pasos utilizan controladores comerciales, la hoja de datos de estos controladores se los puede encontrar en el anexo J, se añadirá un botón con enclavamiento de bloqueo, que servirá para des-energizar a los motores a pasos para poder mover libremente cada uno de sus ejes, las etiquetas de los terminales son las que irán al controlador, en especial la señal de pulsos y dirección para cada driver.

**Figura 2.48** Conexión de los controladores de motores a paso.

d) Aire asistente.

Para el control del aire asistente se requiere un circuito que permita encender en forma cíclica una electroválvula, se usa un relé controlado desde una salida digital de la tarjeta, como se observa en la figura 2.49.

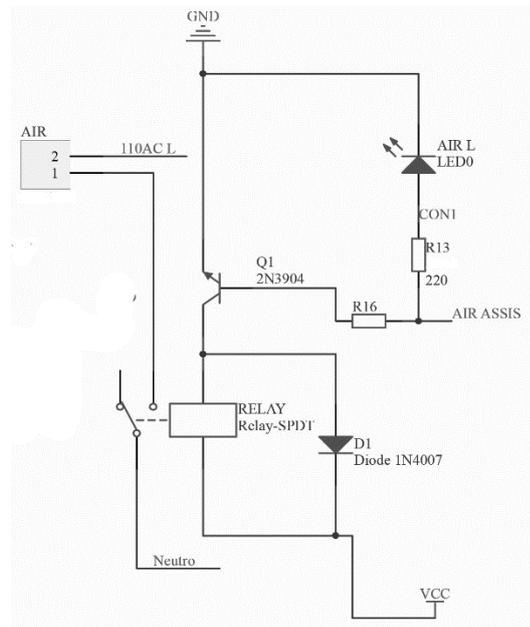


Figura 2.49 Circuito para aire asistente.

Debido a la corriente que maneja la tarjeta es necesario activar un relé para lo cual se utiliza un transistor en modo de saturación para ello tenemos:

La corriente que necesita el relé para su funcionamiento es de 50mA

$I_{\text{relé}} = 50\text{mA}$

La ganancia del transistor 2n3904 va desde 100 a 300, en este caso tomaremos el valor mínimo

$HFE = 100$

El voltaje de operación del ATmega es de 5v.

$V_{\text{in}} = 5\text{V}$

La resistencia necesaria (R16) para que el transistor Q1 funcione como interruptor será de:

$$R16 = \frac{(V_{\text{in}} - 0,7) * HFE}{I_{\text{relé}}}$$

$$R_{16} = \frac{(5 - 0,7) * 100}{50mA} = 8.6 [K\Omega]$$

e) Control fuente láser CO2.

Para el control de la fuente del láser de CO2, hay que considerar los pines de control (Ver figura 2.50), como son: L, H, WP, IN, G, 5V.

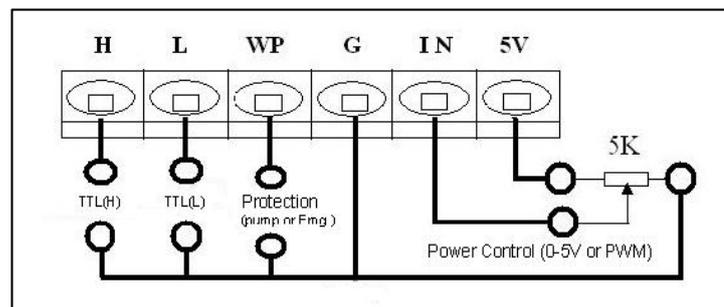


Figura 2.50 Terminales de control de la fuente de láser.

L.- Se utiliza para control de la potencia de láser con una señal TTL donde valores menores a 0,3V representa el nivel 1

H.- al contrario que el anterior se utiliza cuando se pretende que a señales mayores a 5v se le considere como nivel lógico 1

WP.- (Wáter Protection).- cuando existe un nivel lógico 1 en este puerto se desactiva el láser

IN.- este puerto sirve para establecer un valor de potencia para el láser de manera analógica hasta el valor máximo permitido.

En los pines de la bornera que se muestra en la figura 2.51 el pin 1 se conectara IN, en el pin 2 se conectara H, en el pin 3 WP, y por último en el pin 4 se conectara G.

CONT LÁSER se refiere a la señal de control PWM que llegara desde el microcontrolador.

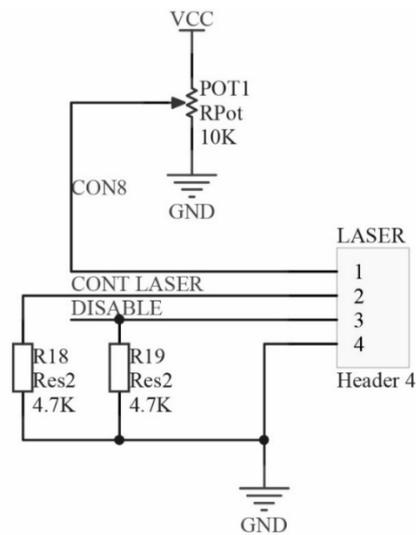


Figura 2.51 Circuito para el control de la fuente láser.

f) Sensores

Las máquinas CNC utilizan sensores para determinar el inicio y fin del área de trabajo (X, Y).

Existen 6 finales de carrera, 2 para el eje “Y”, 2 para el eje “X” y uno como protección para deshabilitar el láser mientras la puerta está abierta.

Así como también hay una entrada de protección que deshabilita el funcionamiento del láser mientras no esté encendido el sistema de refrigeración con agua (CHILLER).

El circuito que se implementa en cada uno de estos sensores es igual al que se puede ver en la figura 2.52.

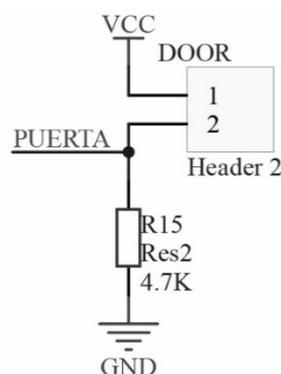


Figura 2.52 Resistencia PULL-DOWN.

Un circuito PULL-DOWN o PULL-UP sirve para no mantener voltajes flotantes en los puertos de entrada del microcontrolador, evitando tener señales falsas o erróneas y ruido: es así que el valor de resistencia utilizado fue el de 4.7K por ser común en el mercado, a su vez la corriente máxima que circulara por este circuito será de $I=5V/4.7K=1mA$, por lo que se evita un consumo excesivo de corriente.

g) Circuito lógico de deshabilitación del láser.

En la figura 2.53 se muestra el diagrama de un circuito de protección que funciona independientemente del controlador, cuando existe un nivel lógico alto (DISABLE=1) se desactivará el funcionamiento del láser; se activa cuando cualquiera de los sensores (Finales de carrera, puerta y chiller) envíen una señal.

Se optó por hacerlo de forma independiente del controlador, para que este circuito actúe de manera instantánea a una señal de entrada, sin esperar que el controlador termine de ejecutar algún proceso del programa.

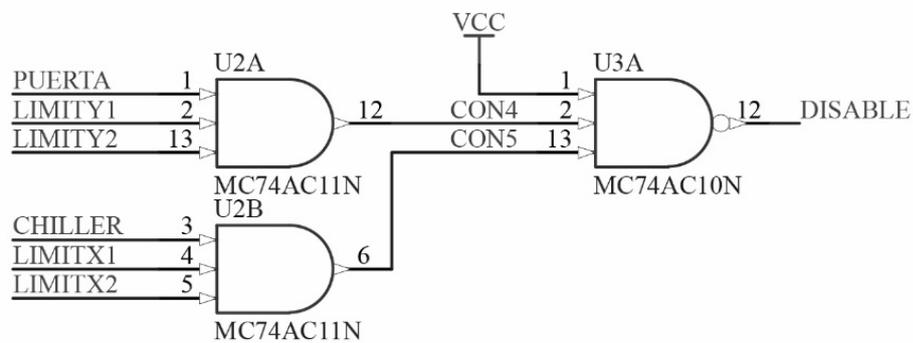


Figura 2.53 Circuito de deshabilitación del láser de CO2.

La tabla 2.8 muestra los diferentes estados que se puede obtener del circuito mostrado en la figura 2.53.

Tabla 2.8 Estados del circuito de seguridad.

	X1	Y1	X2	Y2	CHILLER	PUERTA	U2A	U2B	DISABLE
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	X	X	X	X	X	0	0	X	1
	X	X	X	X	0	X	X	0	1
	X	X	X	0	X	X	0	X	1
	X	X	0	X	X	X	X	0	1
	X	0	X	X	X	X	0	X	1
	0	X	X	X	X	X	X	0	1

h) Comunicación

La comunicación entre el microcontrolador ATmega 328p-PU y la tarjeta embebida BEAGLE BONE BLACK (BBB) se lo realiza mediante comunicación serial (P9-26, P9-24; rx, tx respectivamente), además LasaurApp añade una rutina de reset hacia el ATmega utilizando el pin P8-44 la BBB, el circuito se lo muestra en la figura 2.54.

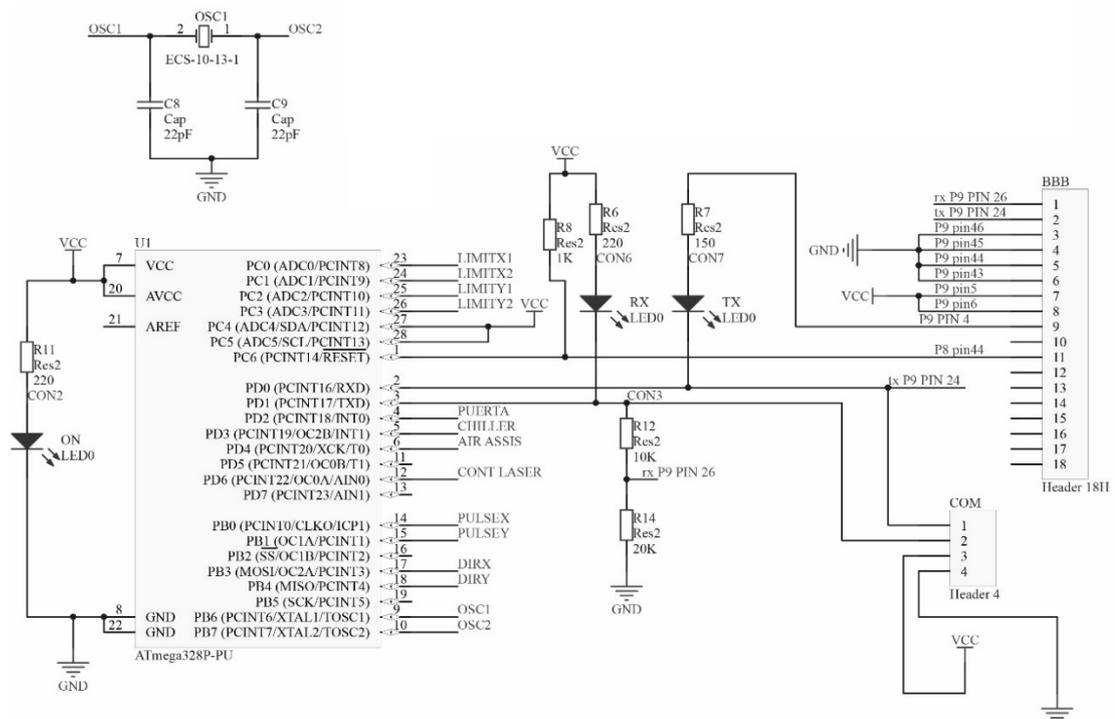


Figura 2.54 Comunicación entre la BBB y el ATmega 328p-PU.

La resistencia 14 y 12 conectadas en serie funcionan como divisor de tensión, puesto que el voltaje de operación del puerto serie de la BBB es de 3.3V.

$$V_{R14} = \frac{20K\Omega * 5V}{10K\Omega + 20K\Omega} = 3.33V$$

El circuito en su totalidad se lo puede ver en el anexo I.

4.4 Hardware y software libre

4.4.1 BegleBoneBlack (BBB)

LasersaurApp se puede ejecutar en diversas tarjetas embebidas (Raspberry PI, Beglebone Black), en computadores de escritorio y portátiles, se decidió utilizar la BBB por el tamaño, la versatilidad, y bajo costo que representa frente a una computadora de escritorio o portátil, la velocidad de procesamiento es más rápida frente a otras tarjetas embebidas, Otra de las características frente a una computadora personal o de escritorio es la fácil manipulación de los pines de control, a su vez estos pueden ser montados directamente sobre la tarjeta controladora como el ejemplo que se puede ver en la figura 2.55, logrando de esta forma optimizar espacio y recursos.



Figura 2.55 Tarjeta BBB montada directamente.

Fuente: (NexLab, 2015)

a) Área de trabajo en LasersaurApp

Es necesario descargar la última versión de LasersaurApp:

```
git clone git://github.com/stefanix/LasaurApp.git
```

Dentro de la carpeta dirigirse a:

```
LasaurApp/fronted/js
```

Abrir el archivo:

```
Settings.js
```

En este se encontrará lo siguiente:

```
var app_settings = {
work_area_dimensions: [1220,610],
max_seek_speed: 6000,
default_feedrate: 1500,
default_intensity: 30,
num_digits: 2,
max_num_queue_items: 24,
max_segment_length: 5.0,
table_offset: [5,5], // has to match firmware
}
app_settings.canvas_dimensions =
[610,          Math.floor(app_settings.work_area_dimensions[1]*
610.0/app_settings.work_area_dimensions[0])]

app_settings.to_physical_scale =
app_settings.work_area_dimensions[0]/app_settings.canvas_dimensio
ns[0];
app_settings.to_canvas_scale      =
1.0/app_settings.to_physical_scale;
```

Para poder modificar el espacio de trabajo hay que tener en cuenta la escala de visualización que se está manejando, en el archivo anterior es de 610 pixeles de ancho y 305 pixeles de ancho, en este caso siendo las dimensiones de la máquina 1180x900 con un offset de 10, se procederá a hacer una simple regla de tres, tratando de mantener el mismo ancho:

```
work_area_dimensions: [1210,910],
```

```
app_settings.canvas_dimensions =
[605,          Math.floor(app_settings.work_area_dimensions[1]*
605.0/app_settings.work_area_dimensions[0]))]
```

De esta forma se logra tener un cuadro de visualización de 605px de ancho y 455px de alto, teniendo por cada pixel 2mm

b) Traducción al Español y Modificación de LasersaurApp

Por defecto la aplicación se encuentra en el idioma inglés, para poder modificar el programa es necesario cambiar el idioma en los archivos que el programa llama como una subrutina cuando este se ejecuta, los archivos a modificar serán:

```
LasersaurApp/frontend/app.html
LasersaurApp/frontend/js/app.js
```

Estos archivos se encuentran en el anexo M.

Otras modificaciones que se hicieron en este programa fueron la eliminación de menús que son innecesarios para el correcto funcionamiento de la máquina.

c) Interfaz

En la figura 2.56 se observa la interfaz que tiene el programa el cual cuenta con una barra de menú principal, y una barra de herramientas lateral.

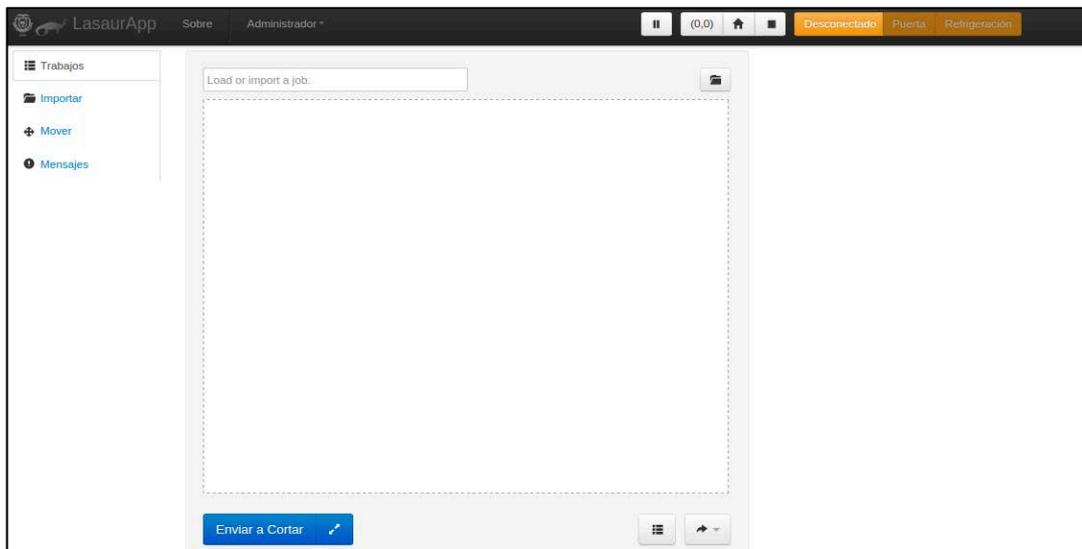


Figura 2.56 Interfaz LasersaurApp Modificada.

En la barra de menús principal se encuentran los siguientes elementos:

- a) **Sobre.-** Muestra información sobre el programa, los autores y la versión del firmware (Ver figura 2.57).

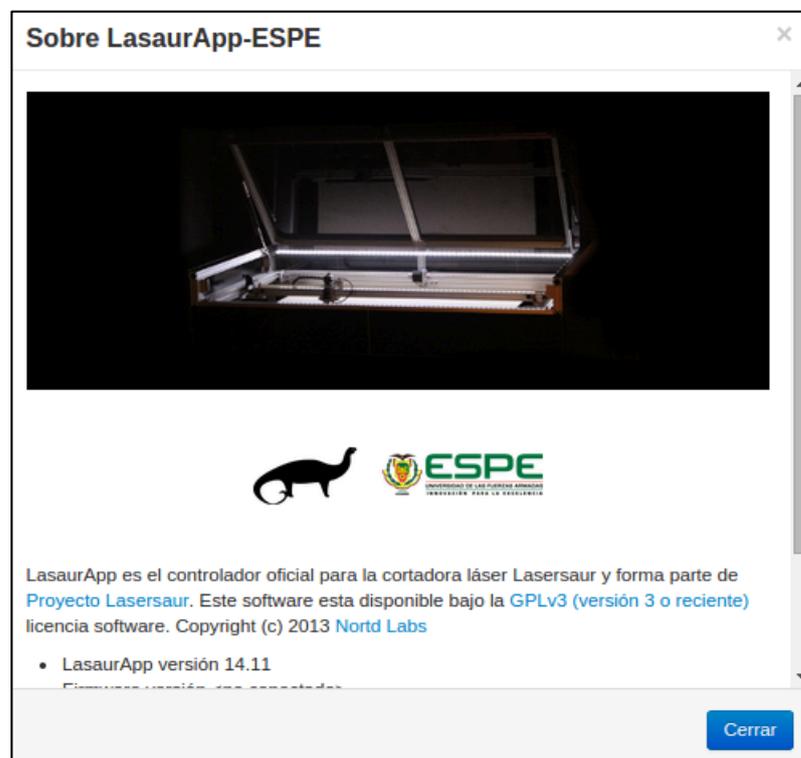


Figura 2.57 Menú Sobre.

b) **Administrador.-** Este a su vez cuenta con dos submenús (Ver figura 2.58).

- **Compilar y cargar desde la fuente.-** sirve para cargar el firmware en el ATmega 328p-PU
- **Resetear ATmega.-** Este comando enviara una nivel lógico 1 por el pin P9-44 de la BBB, reseteando el microcontrolador.



Figura 2.58 Menú Administrador.

En la barra de herramientas tiene 4 menús descritos a continuación:

c) **Trabajos.-** En este menú se puede visualizar el trabajo activo. (Ver figura 2.59).

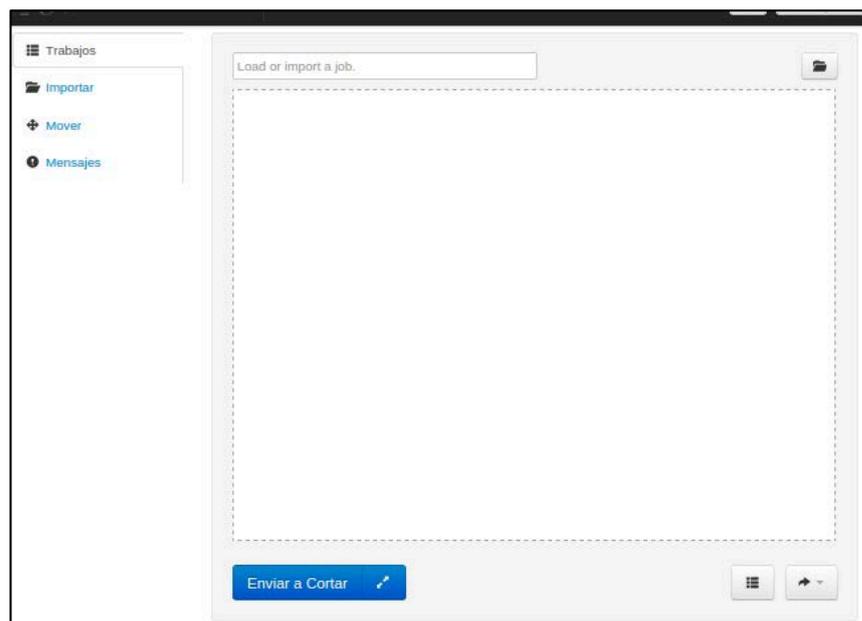


Figura 2.59 Herramienta Trabajos.

d) **Importar Archivo.-** Este menú muestra la opción para importar dos diferentes formatos de Archivos .dxf y .svg (Ver figura 2.60).

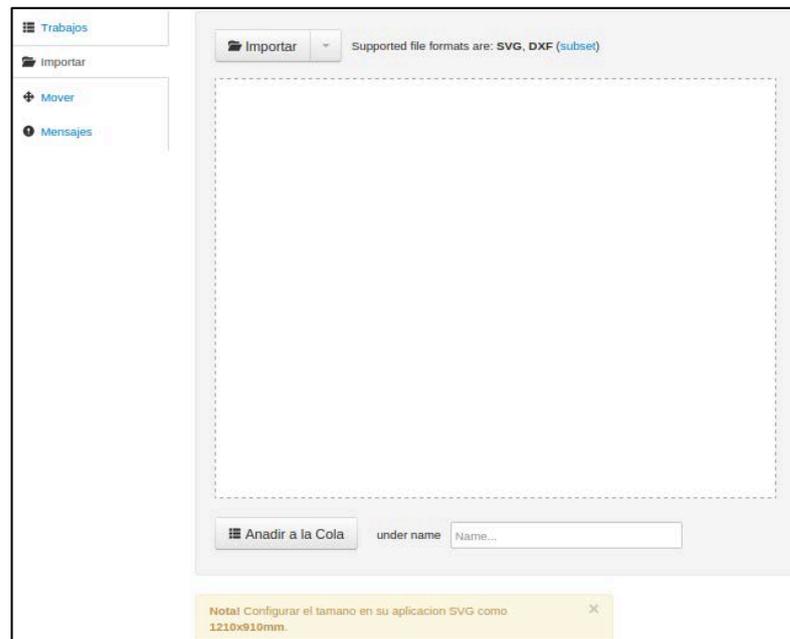


Figura 2.60 Herramienta Importar Archivo.

- e) **Mover.**- Este muestra los comandos básicos necesarios que enviarán la orden al ATmega para que el cabezal se desplace sobre la mesa, así como también hay la opción de realizar cortes sin tener precargado archivo alguno, utilizando o no asistente de aire (Ver figura 2.61).

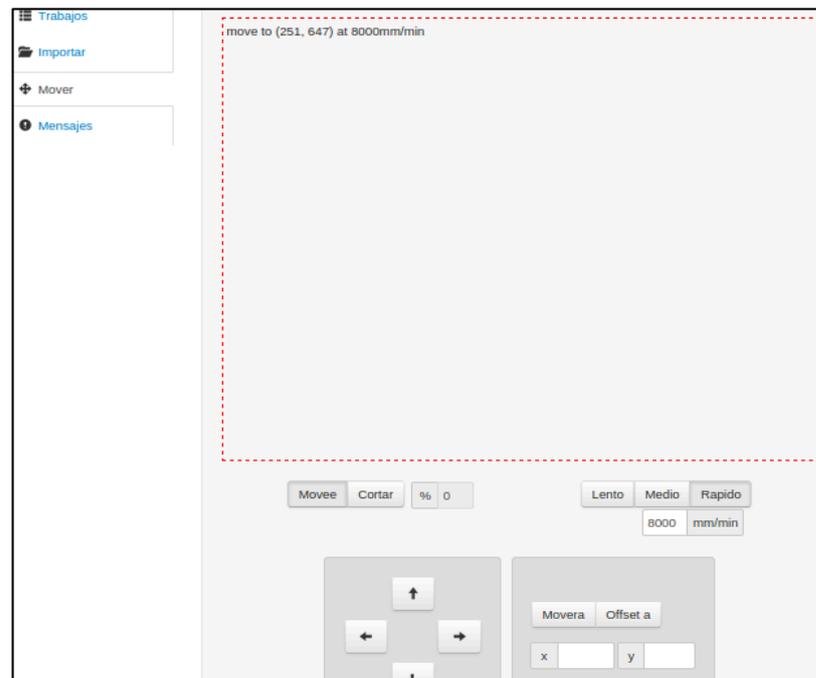


Figura 2.61 Herramienta Mover.

- f) **Mensajes.**-Este muestra los mensajes de aviso que se van generando mientras corra el programa, así como mensajes de error y advertencia (Ver figura 2.62).

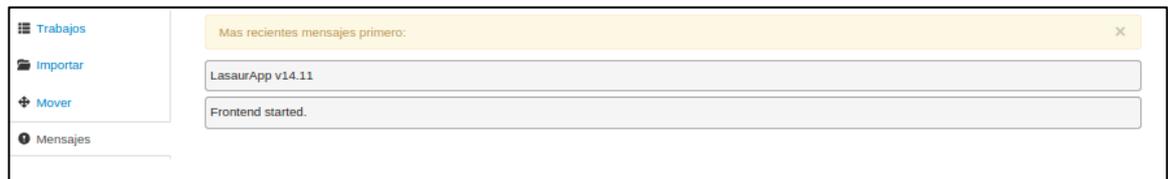


Figura 2.62 Herramienta Mensajes.

Lasersaur App, cuenta también con tres botones principales ubicados al lado derecho en la parte superior (Ver figura 2.63):



Figura 2.63 Botones de Estado.

- g) **Conectado/Desconectado.**- Muestra si existe comunicación entre la BBB y el ATmega.
- h) **Puerta.**- Muestra si se ha cerrado la puerta de la máquina.
- i) **Enfriador (Sistema de refrigeración).**- Muestra si se ha energizado el enfriador.

4.4.2 Arduino Uno

El elemento principal que contiene el intérprete de códigos G es el ATmega 328p-PU que utiliza un Bootloader (Programa de arranque), así como los pines de salida (PWM Láser, Asistente de aire, señales para los Drivers) de control y los de entrada (finales de carrera, puerta, enfriador) corresponden a la tarjeta Arduino Uno.

d) Grbl Láser

Para modificar el número de pulsos, así como la velocidad de la máquina CNC se realiza pequeños cambios en el firmware (GRBL Láser) del ATmega 328p-PU este cambio se puede ver a continuación (Archivo completo en anexo M):

El número de pulsos necesarios para dar una revolución en el Eje X es de 1600, es así que los pasos necesarios para alcanzar un milímetro será de:

$$\#Pasosxmilimetro_x = \frac{1600}{22 * 3} = 24.242424$$

El número de pulsos necesarios alcanzar un milímetro en el eje Y será de:

$$\#Pasosxmilimetro_y = \frac{800 * i}{(22 * 3)} = \frac{800 * 1.375}{(22 * 3)} = 16.666$$

i = relacion de transmision

Con estos datos calculados se procede a modificar el siguiente archivo.

```
/LasaurGrbl/Config.h
```

Se introduce los valores obtenidos en las líneas.

```
#define CONFIG_X_STEPS_PER_MM 24.242424 //microsteps/mm  
#define CONFIG_Y_STEPS_PER_MM 16.666666 //microsteps/mm
```

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

6.1 Implementación del sistema mecánico

6.1.1 Cabezal láser

Una de las principales partes de los diferentes sistemas y mecanismos presentes en la máquina láser CNC es el cabezal, ya que es por medio de este que el haz de luz láser termina su desplazamiento y llega al material a fin de cortar o grabar.

El cabezal láser está montado en el eje X, se mueve a lo largo de este gracias a 4 ruedas en V con rodamientos internos. La base del cabezal posee diferentes taladros que permiten el ensamble del resto de piezas que lo conforman. Su principal función es de movilizar un espejo reflector y un lente óptico presente en la boquilla láser, el cual refleja la luz que realiza el corte. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra la implementación del cabezal láser y se indica sus partes:

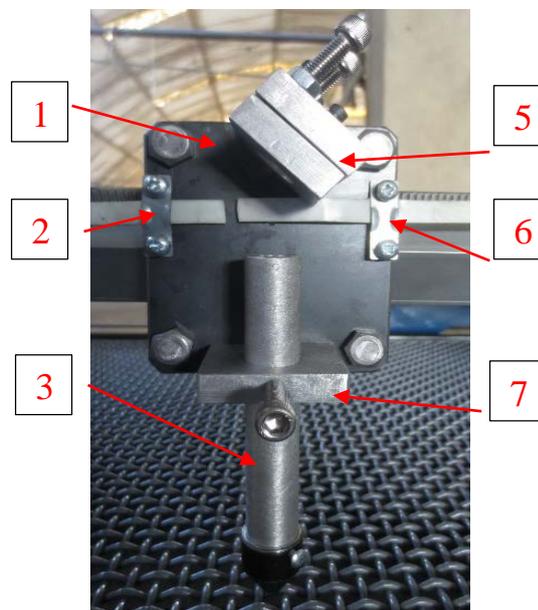


Figura 3.1 Montaje del cabezal láser

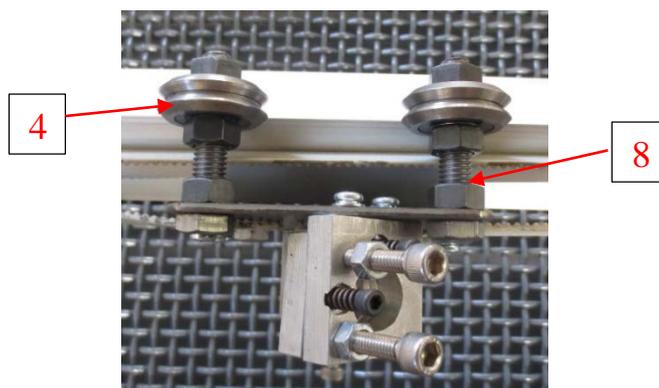


Figura 3.2 Partes del cabezal láser

(1) Base del cabezal, (2) Correa dentada, (3) Boquilla láser, (4) Ruedas en V, (5) Soporte espejo, (6) Sujetadores de correa, (7) Bocín sujetador de la boquilla, (8) Pernos y tuercas.

6.1.2 Sistema de desplazamiento del eje Y

Está conformado principalmente por dos ejes paralelos que serán las guías sobre el cual se monta el eje X. El desplazamiento del carro X se realiza por medio del sistema polea – correa. El movimiento es transmitido desde el motor a pasos por medio de un eje de transmisión sujeto por dos chumaceras y finalmente poleas dentadas. En las figuras 3.3, 3.4, 3.5 se muestra el mecanismo del eje Y y sus partes:

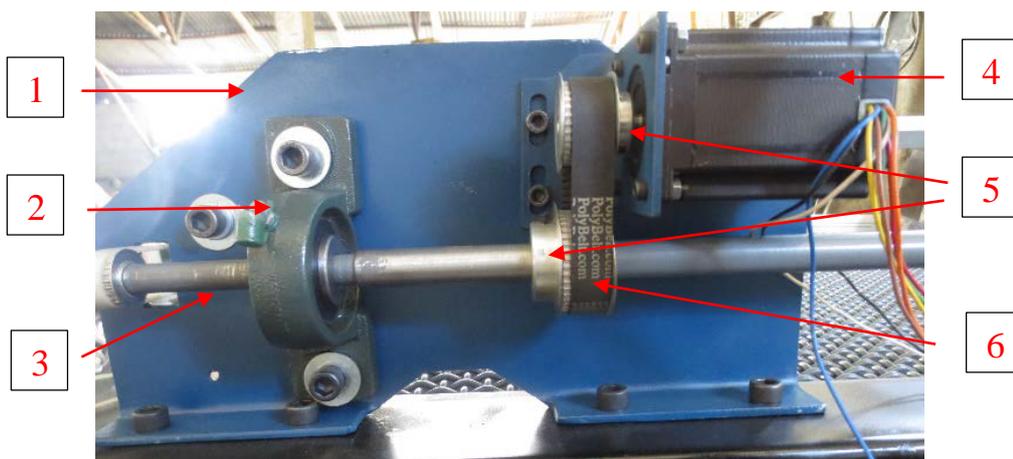


Figura 3.3 Montaje eje Y

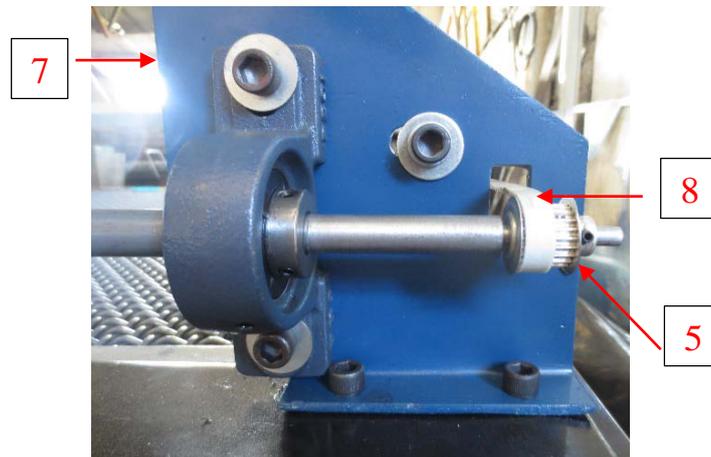


Figura 3.4 Montaje eje Y

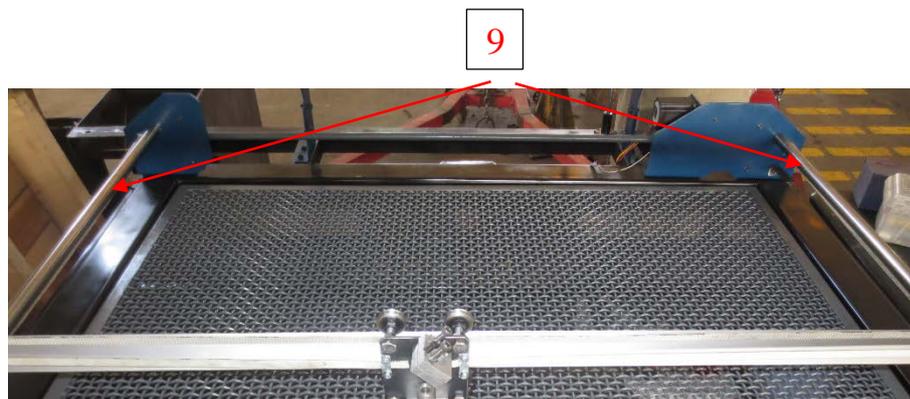


Figura 3.5 Montaje eje Y

Para el retorno de la correa dentada en los extremos de los ejes paralelos se encuentra un sistema de polea llana sujeta a las bases frontales por medio de templadores que permiten ajustar adecuadamente la correa. En las figuras 3.6 y 3.7 se muestran el montaje y se detallan las partes que lo conforman.

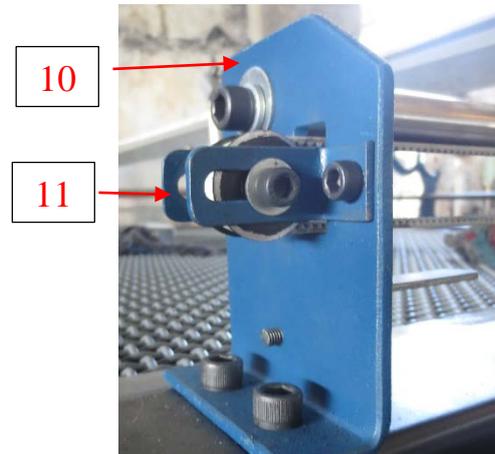


Figura 3.6 Montaje eje Y



Figura 3.7 Partes de polea y templador

(1) Base eje Y trasera 1 , (2) Chumaceras, (3) Eje de transmisión, (4) Motor a pasos, (5) Poleas dentadas, (6) Banda dentada, (7) Base eje Y trasera 2, (8) Correa Dentada, (9) Ejes Paralelos, (10) Bases eje Y frontales, (11) Sistema de polea y templador , (12) Polea, (13) Rodamientos, (14) Pernos, bocines y anillos, (15) Templadores.

6.1.3 Sistema de desplazamiento del eje X

El mecanismo de movimiento del eje X está conformado principalmente por el perfil cuadrado de aluminio con dos soportes a los extremos. Los soportes laterales del perfil poseen 6 rodamientos para un fácil deslizamiento sobre eje Y configurados de la siguiente manera: 4 rodamientos en la parte superior del eje paralelo Y y cuatro en

la parte inferior con regulación de altura para el ajuste. El eje X tiene dos funciones principales: la primera es permitir el movimiento del cabezal láser; la segunda es desplazar la luz láser que está paralela al eje Y por medio del soporte del espejo que está montado sobre uno de los soportes del carro. A continuación se detallan los elementos del mecanismo del eje X y se puede observar en las figuras 3.8, 3.9, 3.10 3.11 y 3.12.

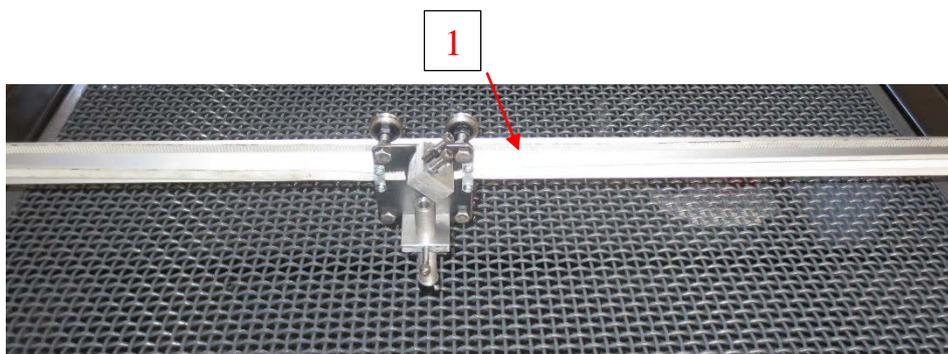


Figura 3.8 Perfil eje X

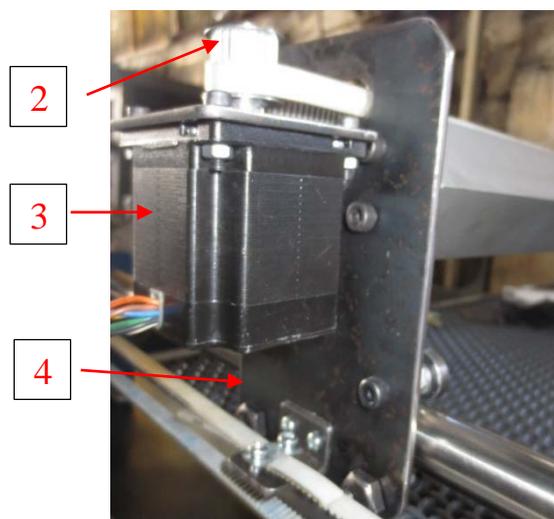


Figura 3.9 Montaje del Eje X

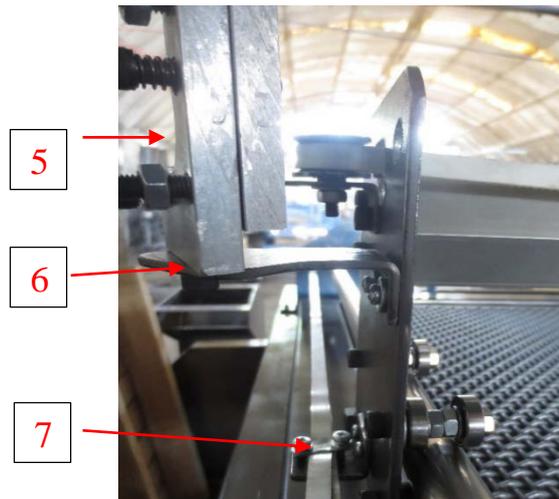


Figura 3.10 Montaje del Eje X



Figura 3.11 Montaje Eje X

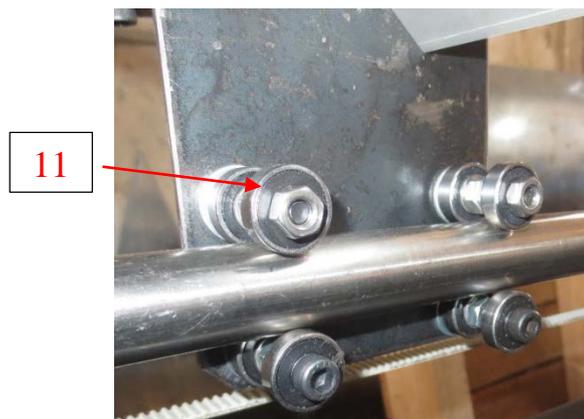


Figura 3.12 Montaje Eje X

(1) Perfil cuadrado, (2) Polea dentada, (3) Motor a pasos, (4) Soportes Laterales, (5) Soporte espejo, (6) Base soporte espejo, (7) Sujetadores de Correa, (8) Polea, (9) Correa Dentada, (10) Templador, (11) Rodamientos.

6.1.4 Implementación de la transmisión láser

a) Sujeción del tubo láser CO2

En parte trasera del eje Y se incorporó la sujeción para el tubo de CO2 con guías reguladoras de altura. Ver figura 3.13.

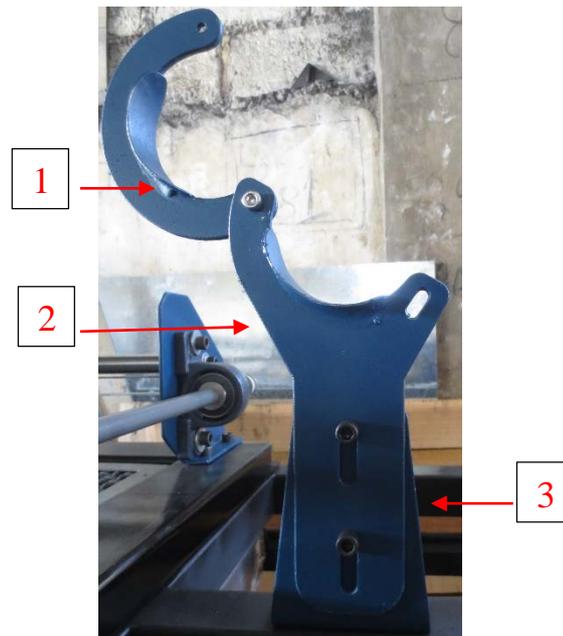


Figura 3.13 Montaje del sujetador láser

(1) Sujetador láser, (2) Soporte láser, (3) Base del soporte láser

b) Soporte para los espejos

El haz de láser se desplaza a lo largo de los ejes de la máquina gracias a la configuración de los espejos ya que son estos en donde choca la luz y se refleja hasta el próximo espejo a un ángulo $\omega=90^\circ$ como se observa en la figura 3.14. Al ser una máquina cartesiana es necesario que los soportes de los espejos permitan una ubicación adecuada de los reflectores. A continuación se detalla las características de los soportes implementados en el sistema:

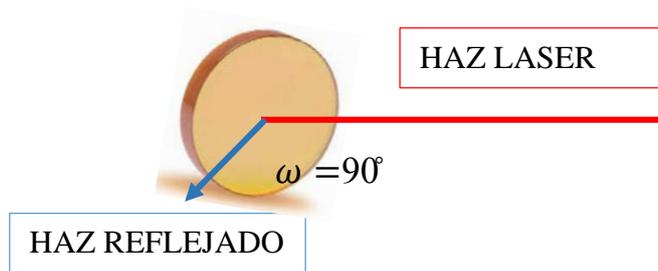


Figura 3.14 Ángulo del haz reflejado por el espejo.

- El primero se puede observar en la figura 3.15 y se coloca fijamente en la estructura principal de la máquina de tal manera que el espejo quede en línea recta con la boquilla del tubo por donde se emite la luz y con una inclinación de 135° a fin de reflejar la luz en forma perpendicular al eje de transmisión Y.

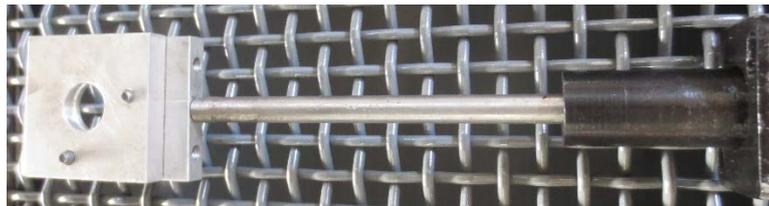


Figura 3.15 Montaje soporte espejo eje Y

- El segundo soporte está sujeto al mecanismo del eje X, ubicado a la misma altura que el primero y formando un ángulo de 135° con los ejes paralelos del eje Y, de esta manera el espejo tendrá la inclinación necesaria para recibir el haz del láser desde el primer espejo y reflejarlo hasta el próximo espejo. Ver figura 3.16.



Figura 3.16 Montaje soporte espejo eje X

- El tercero se encuentra colocado en el cabezal láser, este espejo recibirá el haz de luz del segundo y lo reflejará hasta el lente óptico que se encuentra por debajo del soporte, razón por la cual se debe formar un ángulo de 45° entre el perfil del eje X y la punta de la boquilla láser. Ver figura 3.17.



Figura 3.17 Montaje soporte espejo cabezal láser.

Cada soporte de espejo posee un mecanismo de pernos y resortes que permiten la regulación exacta de ángulo requerido para reflejar la luz al ángulo deseado.

El soporte del espejo consiste en dos placas de aluminio: en la primera se coloca el espejo de 20 mm de diámetro sujetado con una vincha interior; la segunda placa se coloca sobre la primera, estas dos se sujetan por medio dos pernos con hueco pasante para la segunda placa y roscado para la primera, un resorte está ubicado en cada perno de tal manera que su fuerza de compresión mantiene unidas las dos placas. Tres pernos M6 se enroscan en la segunda placa, ubicados de tal manera que al girar cualquiera de estos se inclina la primera placa lentamente y por ende el espejo a fin que la luz láser sea reflejada en la dirección apropiada. En la figura 3.18 se muestra la explosión del ensamble del soporte del espejo para mayor comprensión.

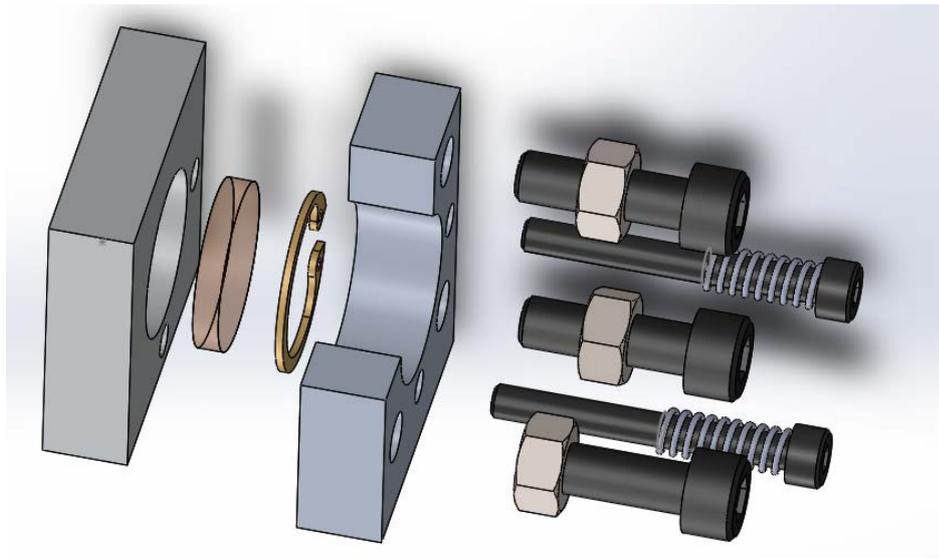


Figura 3.18 Ensamble del soporte del espejo

A continuación se enlista las partes de los soportes de espejos y la figura 3.19 muestra a cada una de ellas:

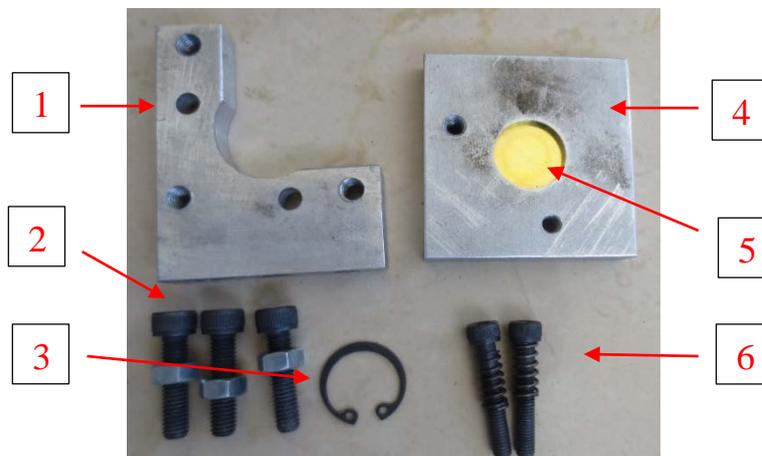


Figura 3.19 Partes de los soportes de espejos

(1) Placa de aluminio 1, (2) Pernos y tuercas, (3) Anillo de retención interior, (4) Placa de aluminio 2 o porta espejo, (5) Espejo, (6) Resortes.

c) Boquilla láser

Después que la luz láser llega al tercer espejo esta es reflejada hasta el lente óptico montado en la boquilla láser. Esta tiene una regulación de altura para ajustar la distancia focal según el espesor de la pieza a cortar o grabar. En la boquilla láser cerca de la punta existe una entrada de aire comprimido donde se colocará una manguera

seguida de una electroválvula que abrirá el paso de aire. En la figura 3.20 se puede observar la boquilla láser y sus elementos:

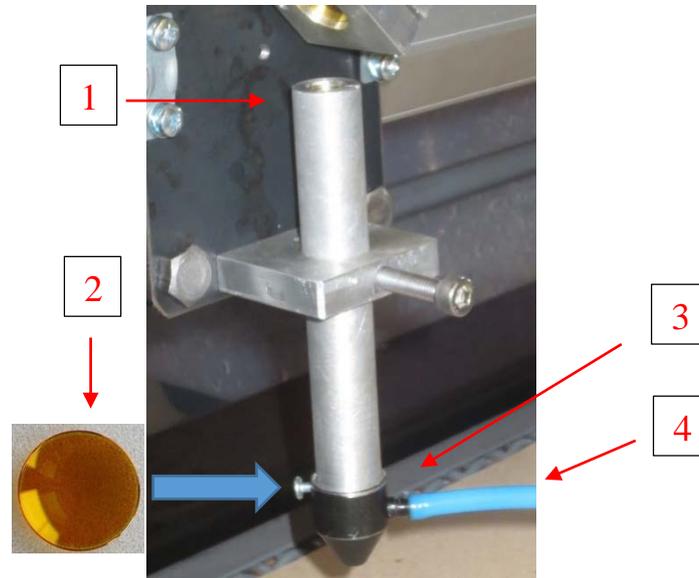


Figura 3.20 Montaje boquilla láser

(1) Regulación de altura, (2) Lente óptico, (3) Boquilla, (4) Entrada de aire comprimido.

d) Trayectoria haz de láser

La trayectoria del haz de láser que recorre a través de los espejos hasta el lente óptico se muestra con línea roja en la figura 3.21.

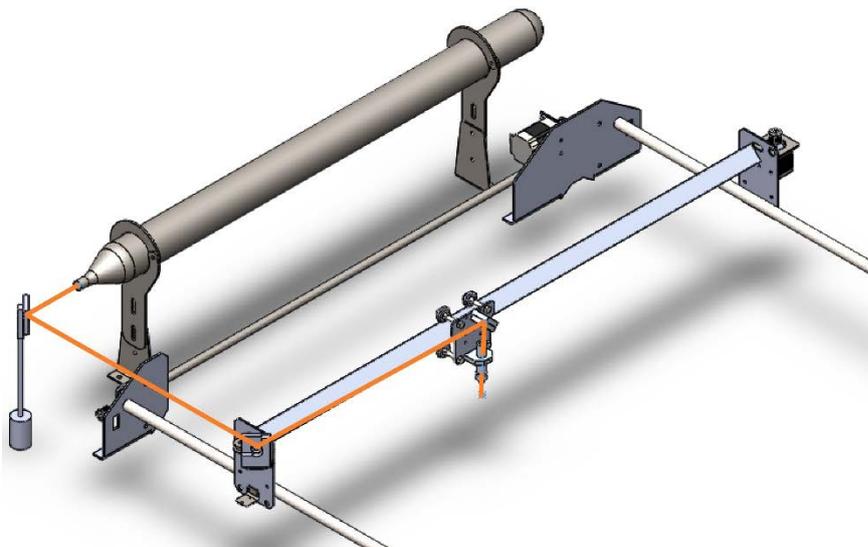


Figura 3.21 Montaje boquilla láser

6.1.5 Sistema de refrigeración

Para que el tubo láser CO₂ conserve su temperatura ideal de trabajo se instala un sistema de enfriamiento con las siguientes características: se incorpora un tanque reservorio de agua, la cual es impulsada por una bomba hacia el tubo láser. Una vez que el agua atraviesa el tubo, se dirige hacia un radiador y finalmente regresa al tanque reservorio. En la figura 3.22 se muestra los elementos del sistema enfriamiento.

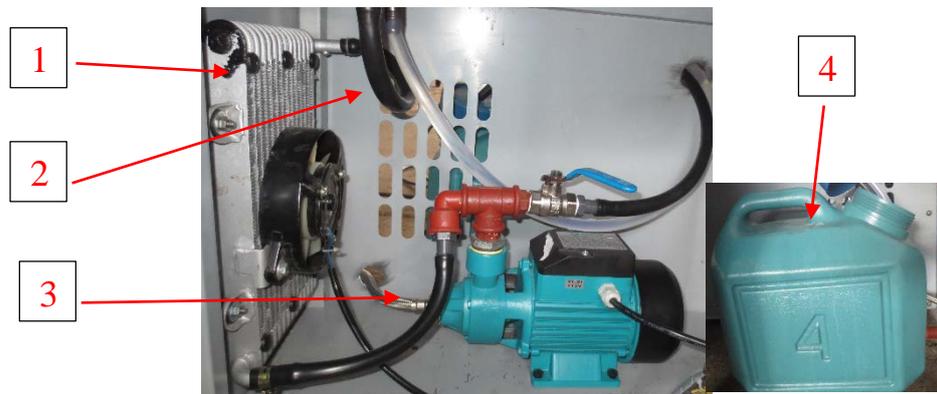


Figura 3.22 Montaje del sistema de refrigeración

(1) Radiador, (2) Mangueras, (3) Bomba, (4) Tanque reservorio.

6.1.6 Sistema de absorción de humo

Debido a que el proceso de corte con rayo láser CO₂ genera una considerable cantidad de humo que debe ser expulsado de la máquina, es necesario la implementación de un sistema de limpieza y absorción de humo.

Se implementa una bandeja metálica ubicada por debajo de la mesa de trabajo donde caerán los desperdicios generados del corte y grabado láser. En la parte posterior de la bandeja se encuentra una toma para la colocación del absolvedor de humo y polvo. La figura 3.23 se muestra el sistema de absorción implementado.

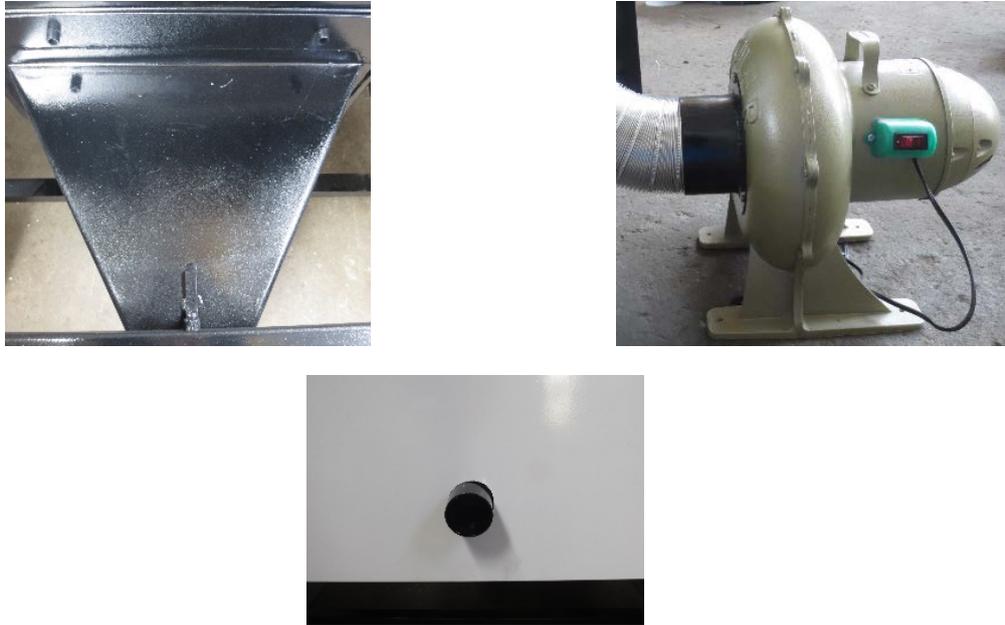


Figura 3.23 Montaje del sistema de absorción de humo

6.1.7 Estructura y carcasa

La estructura de la máquina está conformada por una base en forma de cuadrada donde se soporta los mecanismo X e Y. Posee cuatro soportes laterales, una base inferior en forma de cuadro formando así una estructura tipo mesa, en la parte posterior de la máquina se encuentra una tercera base donde se emperna los soportes para el tubo láser.

La carcasa recubre toda la máquina, posee dos tapas una frontal que sirve de puerta y otra trasera que cubre el tubo láser. En la figura 3.24 se muestran la carcasa implementada.



Figura 3.24 Estructura y carcasa

6.2 Implementación del sistema de control

6.2.1 Placa electrónica

El sistema de control de la máquina consiste básicamente en una placa electrónica con dos componentes principales: el ATmega 328P-PU donde se incorporó el intérprete de códigos G además contiene el Grbl para que la máquina funcione como cortadora láser; la tarjeta Beagle Bone Black que permite el desarrollo del software Lasersaur App que es la interface entre la máquina y el usuario; finalmente existen una serie de pines de entrada-salidas de señales lógicas y borneras para alimentación a los diferentes componentes de la máquina.

Una vez realizado el diseño de la placa electrónica en el software Altium Designer se procedió a la fabricación del circuito impreso de doble lado, con agujeros metalizados, con máscara antisolder y silk screen. El esquema de la placa electrónica se encuentra en el anexo I. La figura 3.25 muestra el circuito impreso.

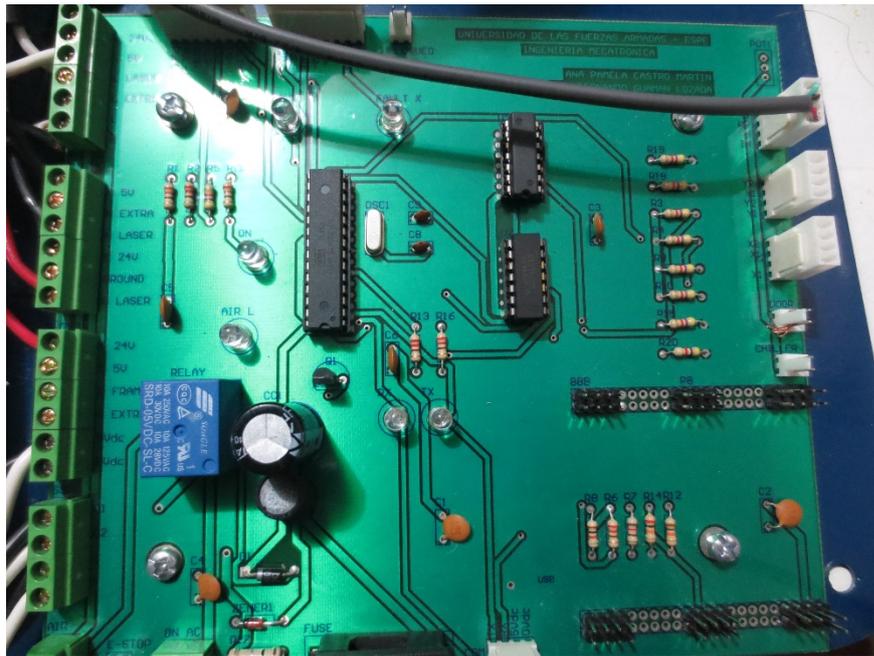


Figura 3.25 Implementación de la placa electrónica

6.2.2 Tablero Eléctrico/ Electrónico

A fin de incorporar todos los elementos eléctricos y electrónicos presentes en el sistema se implementó un tablero donde se ubican cada una de las fuentes de voltajes, placa electrónica, controladores para motores a paso y el relé de estado sólido.

En la figura 3.26 se muestra el tablero eléctrico/ electrónico implementado completamente y se detallan sus componentes.



Figura 3.26 Implementación del tablero eléctrico/electrónico

(1) Drivers, (2) Fuente 24 V DC, (3) Fuente para láser 80 Watts, (4) Placa electrónica, (5) Relé de estado sólido, (6) Fuente 5 V DC.

- **Configuración de drivers**

Los drivers leadshine EM 503 poseen 8 switch ON – OFF que permiten la configuración de parámetros importante para el funcionamiento de los motores a pasos.

Para el eje Y se utiliza un motor a pasos nema 23 modelo 57HS13 leadshine por lo que en base a la tabla 3.1 el SW1, SW2, SW3 se ubican en ON pues se requiere que la corriente dinámica sea por default. El SW4 se ubica en ON para que el controlador envíe menor corriente al motor cuando esté en reposo (Ver tabla 3.2). Para lograr la resolución de 0,06 mm se dispondrá de 800 pasos por revolución en el eje y entonces esta será la configuración según la tabla 3.3: SW5 - ON, SW6 - OFF, SW7 - ON y SW8 – ON: y de 1600 pasos por revolución en el eje x: SW5 - OFF, SW6 - OFF, SW7 - ON y SW8 – ON:

Para el eje X se utiliza un motor a pasos nema 23 modelo 57HS09 leadshine cuyo driver se configura igual que el anterior.

Tabla 3.1 Configuración de switch para corriente

DIP Switch Settings				
Dynamic Current				
Peak	RMS	SW1	SW2	SW3
Default	Default	on	on	on
1.46A	1.04A	of	on	on
1.91A	1.36A	on	off	on
2.37A	1.69A	off	off	on
2.84A	2.03A	on	on	off
3.31A	2.36A	of	on	off
3.76A	2.69A	on	off	off
4.20A	3.00A	off	off	off

Fuente: (Leadshine, 2015)

Tabla 3.2 Configuración para corriente de reposo

	ON	OFF
SW4	The motor idle current reduces automatically when there is no pulse applied to EM503.	The motor idle current is the same as the dynamic current when there is no pulse applied to EM503.

Fuente: (Leadshine, 2015)

Tabla 3.3 Configuración para corriente de reposo

Microstep Resolution

Steps/Revolution	SW5	SW6	SW7	SW8
Software Configured (Default 200)	on	on	on	on
400	off	on	on	on
800	on	off	on	on
1600	off	off	on	on
3200	on	on	off	on
6400	off	on	off	on
12800	on	off	off	on
25600	off	off	off	on
1000	on	on	on	off
2000	off	on	on	off
4000	on	off	on	off
5000	off	off	on	off
8000	on	on	off	off
10000	off	on	off	off
20000	on	off	off	off
25000	off	off	off	off

Fuente: (Leadshine, 2015)

6.2.3 Conexiones externas del tablero

a) Finales de Carreras

La máquina láser de corte y grabado es un sistema cartesiano de dos ejes X Y. Para iniciar el trabajo es necesario ubicar el cabezal láser en la posición X con coordenada 0 e Y con coordenada 0, es decir posición HOME (0,0); esto se logrará instalando sensores magnéticos con la función de finales de carrera.

Se implementan cuatro finales de carrera: dos de ellos ubicados en los extremos del eje X y dos en los extremos del eje Y para que al desplazarse el cabezal y llegar a

los sensores envíen una señal al controlador indicando que ha llegado a su posición (0,0). En la figura 3.27 se muestra la ubicación de los finales de carrera.

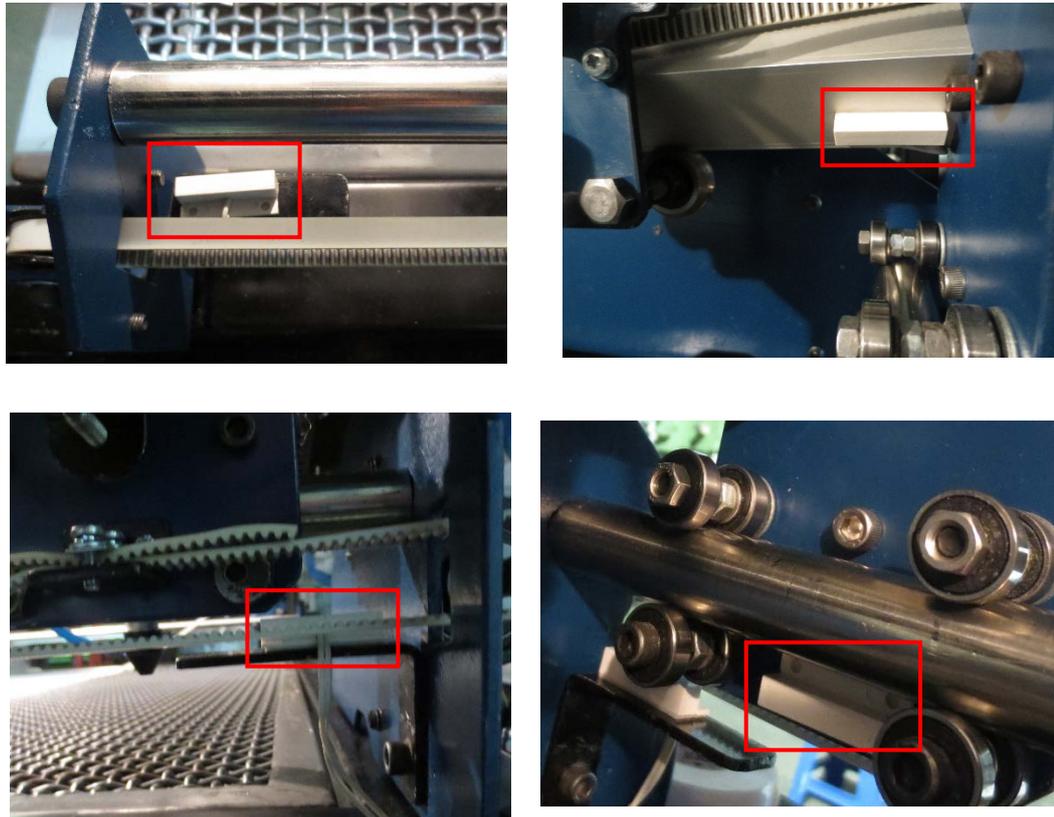


Figura 3.27 Finales de carrera

b) Paro de Emergencia

El paro de emergencia desactiva únicamente el paso de corriente de la fuente de 5V, esta a su vez desactiva al relé de estado sólido encargado del paso de 110 V AC a todo el resto de dispositivos eléctricos- electrónicos. En la figura 3.28 se muestra la ubicación del paro de emergencia.



Figura 3.28 Implementación paro de emergencia

c) Sistema de enfriamiento

La bomba de agua y el ventilador del radiador se encienden por activación manual por medio de un interruptor de dos posiciones. La figura 3.29 muestra la implementación eléctrica del sistema de enfriamiento.



Figura 3.29 Montaje del sistema de enfriamiento

d) Asistente de aire

El aire comprimido cumple una importante función en el proceso de corte y grabado ya que dispersa el humo generado y a su vez protege al lente óptico presente en la boquilla láser.

Consiste en la activación o desactivación mediante software de una electroválvula de paso para aire comprimido. El controlador envía una señal que activará un relé de 5 VDC con lo cual se accionará la electroválvula con un voltaje de 110 VAC. La válvula está instalada en la parte posterior el eje X como se observa en la figura 3.30.



Figura 3.30 Montaje del asistente de aire

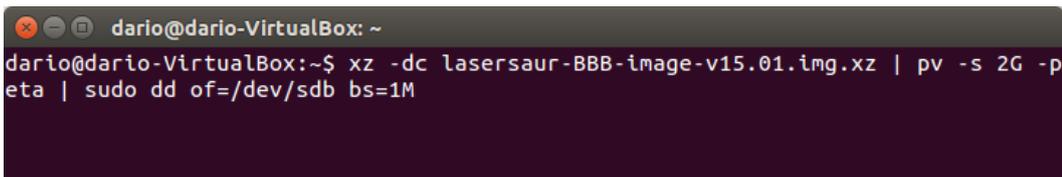
6.3 Software – LasaurApp.

6.3.1 Cargar imagen Lasersaur.

Originalmente la tarjeta Beagle Bone Black tiene como sistema operativo Linux y como en toda plataforma es necesario grabar en su memoria el programa que se desea utilizar que en este caso es el software LasaurApp-ESpe.

Para cargar en la tarjeta SD la imagen de Lasersaur a fin que funcione la aplicación desde la tarjeta Beagle Bone Black (BBB) es necesario seguir algunos pasos que se realizan en el sistema operativo Linux.

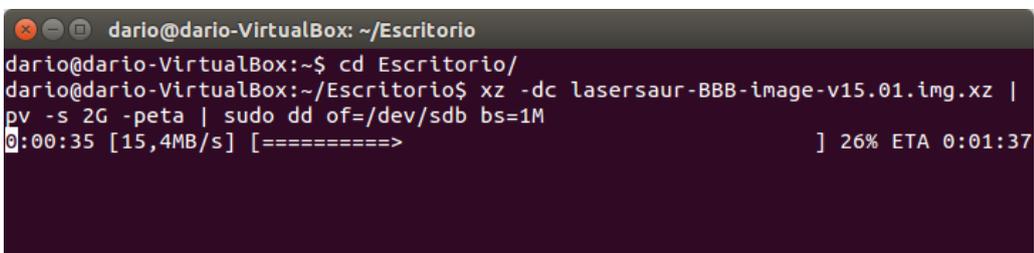
- Obtener `lasersaur-BBB-image-v15.01.img.xz` desde la página web http://www.lasersaur.com/manual/bbb_setup.
- Insertar en el computador la tarjeta micro SD, abrir la terminal de Linux.
- Ejecutando `sudo fdisk -l` antes y después de insertar la tarjeta para saber qué `/dev/sdb bs=1M` es el correcto.
- Ingresar las líneas de comandos como se observa en la figura 3.31.



```
dario@dario-VirtualBox: ~
dario@dario-VirtualBox:~$ xz -dc lasersaur-BBB-image-v15.01.img.xz | pv -s 2G -p
eta | sudo dd of=/dev/sdb bs=1M
```

Figura 3.31 Terminal Linux para cargar imagen de lasersaur.

- Montar la tarjeta SD y copiar el mismo lasersaur-BBB-image-v15.01.img.xz a /root en la partición del sistema. Ver figura 3.32.



```
dario@dario-VirtualBox: ~/Escritorio
dario@dario-VirtualBox:~$ cd Escritorio/
dario@dario-VirtualBox:~/Escritorio$ xz -dc lasersaur-BBB-image-v15.01.img.xz |
pv -s 2G -peta | sudo dd of=/dev/sdb bs=1M
0:00:35 [15,4MB/s] [=====>] 26% ETA 0:01:37
```

Figura 3.32 Copia de imagen lasersaur.

- Asegúrese de desmontar limpiamente.

Apagada la tarjeta Beagle Bone Black insertamos la micro SD, a continuación encenderla. Para comprobar que la imagen de Lasersaur está correctamente cargada. Conectar al computador la BBB por medio del cable USB, esperar que se instale el dispositivo automáticamente e ingresamos a un navegador con la dirección 192.168.7.2. A continuación se observará LasaurApp.

6.3.2 Configuración Wi-Fi

A fin que el usuario pueda ingresar al software sin necesidad de conexión física por medio de un cable, se realizó la configuración wi-fi a través de la cual cualquier dispositivo conectado a la red pueda utilizar LasaurApp. A continuación se detallan los pasos para la implementación de la conexión wi-fi.

- Asegúrese de que el BEAGLEBONE BLACK (BBB) tiene una conexión a Internet a través de un cable LAN. Insertar el módulo Wifi USB y una fuente externa.

Conectarse a 192.168.7.2 utilizando SSH como Putty como se observa en la figura 3.33.

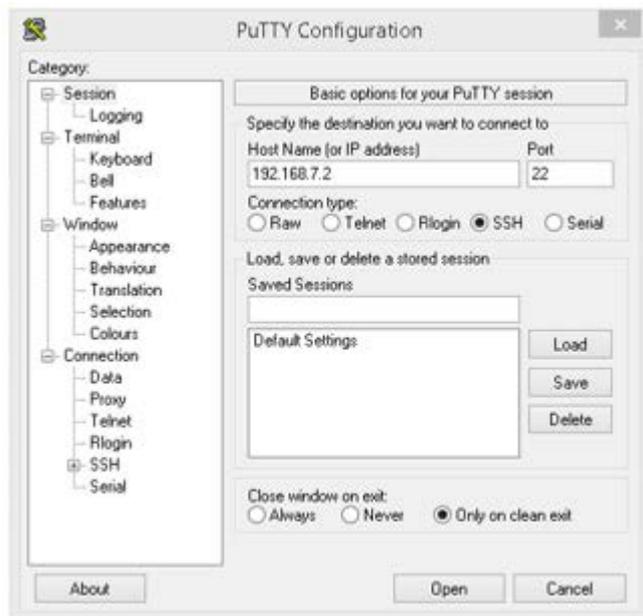


Figura 3.33 Putty SSH

- Al ingresar por SSH se requiere un usuario: “root” y como contraseña “bone”(ver figura 3.34).

```
login as: root
root@192.168.7.2's password:
Welcome to Ubuntu 14.04.1 LTS (GNU/Linux 3.14.22-ti-r31 armv7l)

* Documentation:  https://help.ubuntu.com/
Last login: Sat Mar  7 21:10:39 2015 from fe80::1dc6:747c:cd01:5219%usb0
root@lasersaur:~#
```

Figura 3.34 Ingreso a la terminal de la tarjeta Beagle Bone

- Teclar ifconfig y presionar enter, así se observará las redes conectadas a la BBB. Como se observa en la figura 3.35 no existe red WLAN que representa a Wi-Fi.

```

root@lasersaur:~# ifconfig
eth0      Link encap:Ethernet  HWaddr 78:a5:04:db:61:d1
          UP BROADCAST MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
          Interrupt:56

lo        Link encap:Local Loopback
          inet addr:127.0.0.1  Mask:255.0.0.0
          inet6 addr: ::1/128 Scope:Host
          UP LOOPBACK RUNNING  MTU:65536  Metric:1
          RX packets:1 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:1 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:0
          RX bytes:112 (112.0 B)  TX bytes:112 (112.0 B)

usb0     Link encap:Ethernet  HWaddr 06:60:c0:99:61:5d
          inet addr:192.168.7.2  Bcast:192.168.7.3  Mask:255.255.255.252
          inet6 addr: fe80::460:c0ff:fe99:615d/64 Scope:Link
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:388 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:76 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:37362 (37.3 KB)  TX bytes:18360 (18.3 KB)

```

Figura 3.35 Redes disponibles en la Beagle Bone Black

- Para instalar el dispositivo Wi-Fi es necesario descargar e instalar un nuevo kernel. Desde el teclado ingresar las siguientes líneas:

```

cd ~
ntpdate -b -s -u pool.ntp.org
apt-get update && apt-get install git
git clone https://github.com/adafruit/wifi-reset.git
cd wifi-reset
chmod +x install.sh
./install.sh

```

- Después de instalado el adaptador Wi-Fi se procede a conectarse a la red, para lo cual ingresamos en la terminal:

```
Sudo nano interfaces
```

- Configurar la conexión Wi-Fi, en la línea wpa-ssid se ingresa entre comillas el nombre de la red y wpa-psk entre comillas la contraseña como se observa en la figura 3.36:

```
# WiFi Example
auto wlan0
iface wlan0 inet dhcp
    wpa-ssid "the internets"
    wpa-psk "itpinthehouse"
```

Figura 3.36 Configuración red Wi-Fi

- Reiniciar la BBB, desconectar cable Ethernet y levantar la interface wi-fi:

```
Ifdown wlan0
Ifup wlan0
```

- Verificamos la conexión a internet tecleando ping www.google.com como se observa en la figura 3.37:

```
wlan0      Link encap:Ethernet  HWaddr 00:0d:81:ac:c4:45
            inet addr:192.168.10.104  Bcast:192.168.10.255  Mask:255.255.255.0
            inet6 addr: fe80::20d:81ff:feac:c445/64  Scope:Link
            UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
            RX packets:189 errors:0 dropped:78 overruns:0 frame:0
            TX packets:61 errors:0 dropped:1 overruns:0 carrier:0
            collisions:0 txqueuelen:1000
            RX bytes:27479 (27.4 KB)  TX bytes:11461 (11.4 KB)

root@lasersaur:~# ping www.google.com
PING www.google.com (64.233.177.103) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 64.233.177.103: icmp_seq=1 ttl=37 time=104 ms
64 bytes from 64.233.177.103: icmp_seq=2 ttl=37 time=105 ms
64 bytes from 64.233.177.103: icmp_seq=3 ttl=37 time=514 ms
64 bytes from 64.233.177.103: icmp_seq=4 ttl=37 time=2075 ms
```

Figura 3.37 Verificación de conexión a internet de la BeagleBone Black

6.3.3 Implementación grbl láser

- Se debe cargar el firmware que contiene el código intérprete de códigos G en el Atmega 328 para lo cual se debe descargar el archivo: LasaurGrbl_v13.06.hex
- Una tarjeta Arduino uno se conecta al computador.
- Por medio del programa XLoader, es posible cargar el archivo Grbl en el atmega. Es necesario configurar el puerto de comunicación de la tarjeta Arduino en el computador, la velocidad Baud rate, seleccionar el archivo a cargar como se observa en la figura 3.38. Finalmente se selecciona Upload.

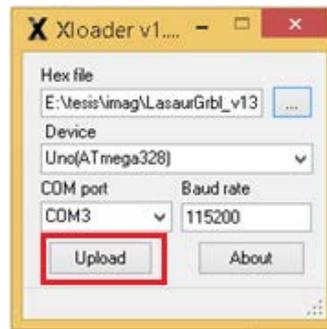


Figura 3.38 XLoader- Carga del grbl láser

El diagrama de flujo de la configuración de la tarjeta BBB se encuentra en el anexo D.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

8.1 Pruebas del sistema mecánico.

Las pruebas en el sistema mecánico se desarrollan en base a las consideraciones que se tomó para el diseño, como es la velocidad y precisión tanto en el eje X como en el Y.

Las pruebas mecánicas que se procedieron a hacer fueron: de perpendicularidad, precisión, velocidad, posicionamiento y profundidad de corte

8.1.1 Prueba de perpendicularidad

Al ser el sistema una estructura cartesiana, es de gran importancia comprobar la existencia de perpendicularidad entre sus ejes (X e Y), para lo cual se realizó la siguiente prueba.

Se cortó 5 veces un triángulo como se muestra en la figura 4.1 y 4.2.

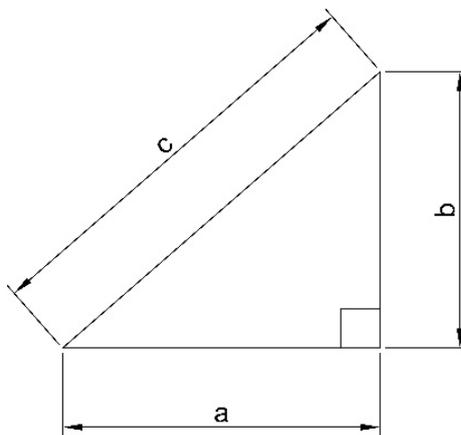


Figura 4.1 Triangulo de Prueba.



Figura 4.2 Cortes para pruebas de perpendicularidad.

De los cortes se midió los lados, y la hipotenusa para compararlos con valores calculados como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores obtenidos en la prueba de perpendicular.

a (medido)	b (medido)	c (medido)	$c (c = \sqrt{a^2 + b^2})$	Error %
98,7	99,1	140,03	140	0,02
68,9	49,4	84,91	85	0,1
129	99	160	163	1,84
118,48	69	137,34	137	0,25
18,7	9,3	20,6	21	1,9
Media				0,82
Desviación				0,96

Como se puede observar de la tabla 4.1 el error promedio alcanzado es de 0.82, con una desviación estándar de 0,96; estos resultados se muestran gráficamente en la figura 4.3.

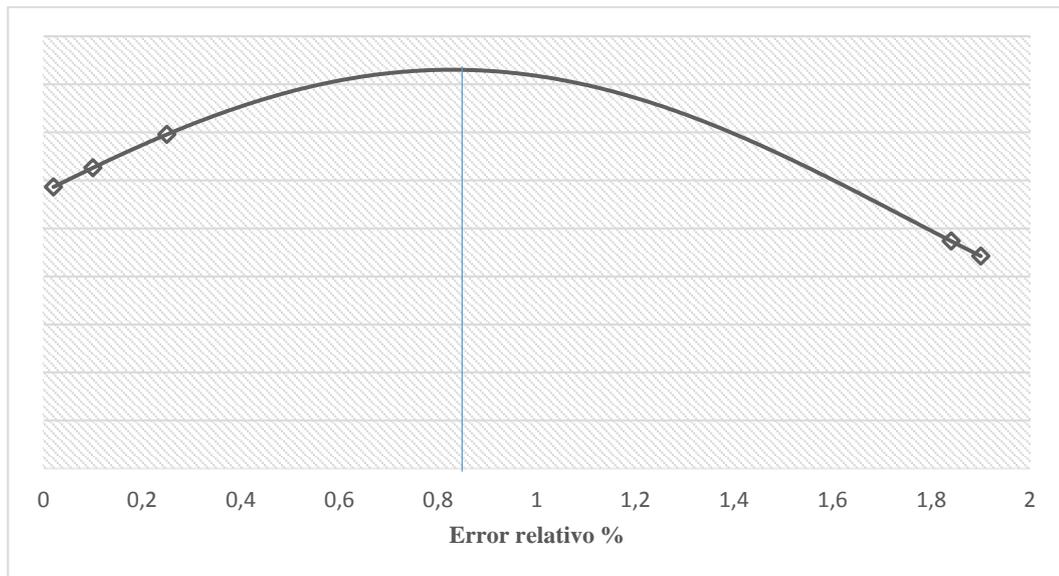


Figura 4.3 Campana de Gauss-Prueba de perpendicularidad.

8.1.2 Prueba de velocidad

Para realizar la prueba de velocidad se introdujo diferentes coordenadas para X e Y, determinando con un cronometro el tiempo que toma llegar al destino, los resultados se muestran en la tabla 4.2, se muestra también el tiempo calculado con la siguiente ecuación.

$$t_T = 2 * t_a + t_{Ctte} \quad (1)$$

Donde:

$t_T =$ tiempo total

$t_a =$ tiempo de aceleracion

$t_{Ctte} =$ tiempo en velocidad constante

$$t_a = \frac{v}{a} \quad (2)$$

$$t_{Ctte} = \frac{e_{Ctte}}{v} \quad (3)$$

$$e_a = \frac{v^2}{2a} \quad (4)$$

$$e_{Ctte} = e_{total} - 2e_a \quad (5)$$

$$t_T = 2 * \frac{V}{a} + \frac{e_{Ctte}}{V} \quad (3 \text{ en } 1) \quad (6)$$

$$t_T = 2 * \frac{V}{a} + \frac{e_{total} - 2e_a}{V} \quad (5 \text{ en } 6) \quad (7)$$

$$t_T = 2 * \frac{V}{a} + \frac{e_{total} - 2\frac{V^2}{2a}}{V} \quad (4 \text{ en } 7) \quad (8)$$

$$t_T = \frac{V}{a} + \frac{e_{total}}{V} \quad (9)$$

Tabla 4.2 Datos obtenidos en la prueba de velocidad.

X	Y	Velocidad	Distancia recorrida	Tiempo cronometrado	Tiempo calculado	Error %
1000	0	2000	1000	30,5	30,16	1,13
1000	0	4000	1000	15,4	15,33	0,46
1000	0	6000	1000	10.6	10.05	6,01
0	800	2000	800	24,1	24,16	0,25
0	800	4000	800	12,4	12,33	0,57
0	800	6000	800	8.31	8.05	3,23
800	800	2000	1131	33,8	34,09	0,85
800	800	4000	1131	17,3	17,29	0,06
800	800	6000	1131	10.65	11.36	2,63
Media						1,69
Desviación						1,95

Como se puede observar de la tabla 4.2 el error promedio alcanzado es de 0,1.69, con una desviación estándar de 1,95; en la figura 4.4 se puede apreciar estos valores gráficamente.

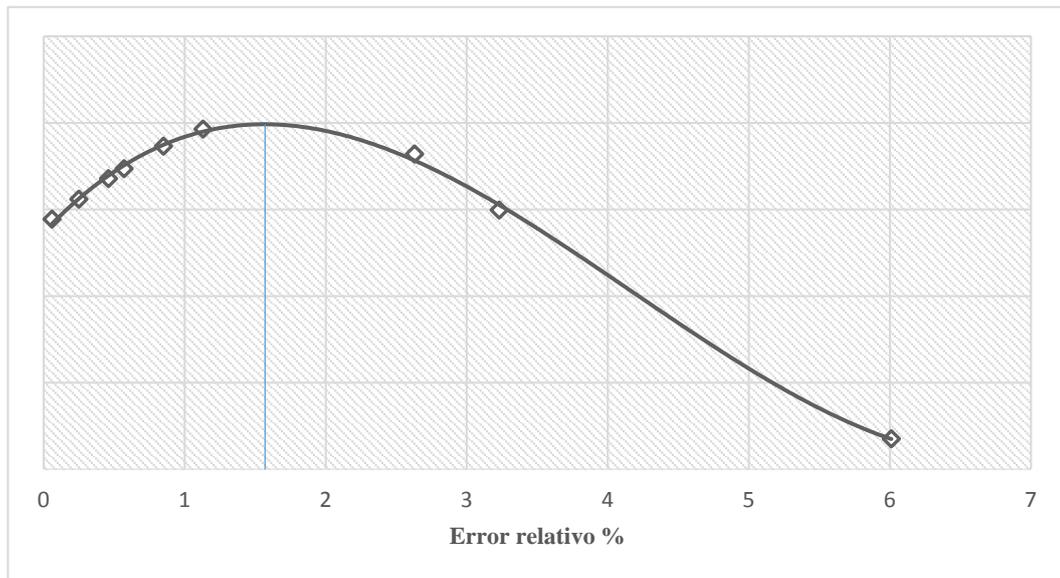


Figura 4.4 Campana de Gauss-Prueba de Velocidad.

8.1.3 Prueba de precisión

Se realizaron cortes en diferentes espesores de madera de la pieza que se observa en la figura 4.5 y 4.6, tomando distintos valores para el valor de X e Y, para luego medirlos y compararlos con los valores reales.

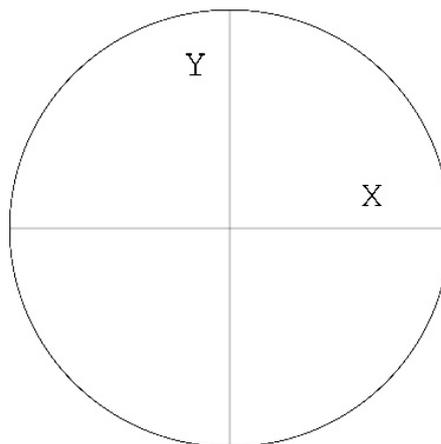


Figura 4.5 Pieza de prueba.



Figura 4.6 Cortes de pruebas de precisión.

Se comparó la distancia que cortó con la distancia real, y se procederá a tabular los datos como se puede ver en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Datos tomados en la prueba de precisión.

Reales		Medidos		Promedio mediciones		Error %	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
70	60	69,7	59,85	69,81	59,86	0,43	0,25
		69,76	59,93				
		69,84	59,77				
		69,96	59,9				
120	90	119,87	89,70	119,88	89,81	0,11	0,33
		119,94	89,71				
		119,97	89,88				
		119,76	89,97				
80	140	79,65	140,15	79,74	140,02	0,44	0,11
		79,72	139,96				
		79,76	140,3				
		79,84	139,67				

70	130	69,3	130,20	69,81	130,63	1,00	0,15
		69,75	129,56				
		69,89	129,84				
		69,79	129,92				
50	100	49,58	99,50	49,73	99,80	0,84	0,50
		49,62	100,03				
		49,96	99,76				
		49,78	99,94				
Media						0,56	0,27
Desviación						0,31	0,13

El error promedio que se puede obtener de los datos tabulados de la tabla 4.3 es de 0.56% para el eje X y 0.27% para el eje Y, estos valores dado el nivel de precisión necesaria por la aplicación son mínimos, cabe indicar que estos valores incluyen el error por medición.

En las figuras 4.7 y 4.8 se pueden ver gráficamente la representación del error en la campana de Gauss.

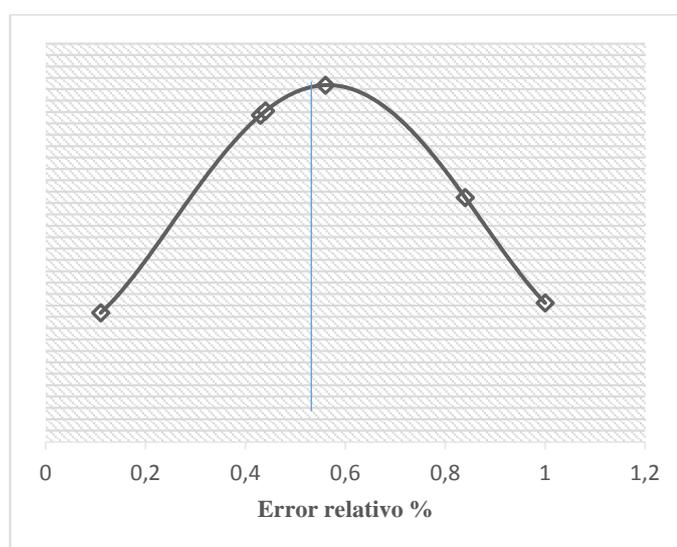


Figura 4.7 Campana de Gauss-Prueba de precisión eje “X”.

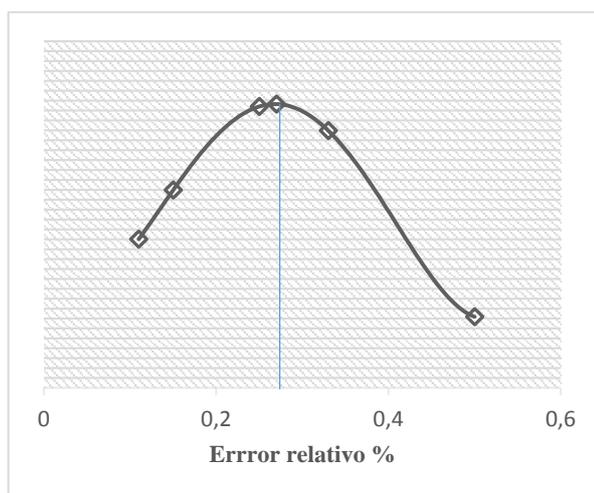


Figura 4.8 Campana de Gauss-Prueba de precisión eje “Y”.

8.1.4 Prueba de posicionamiento

La prueba de posicionamiento es esencial para determinar si al desplazarse el cabezal láser a la máxima velocidad este se ubica en las coordenadas correctas antes de comenzar con el corte o grabado.

Se realiza grabado de vectores sobre una superficie en la que se encuentra preestablecido los ejes X e Y, para luego constatar con las coordenadas introducidas en el controlador.

Tabla 4.4 Datos obtenidos en prueba de posicionamiento.

Coordenadas Enviadas		Coordenadas Medidas		Error %	
X	Y	X	Y	X	Y
50	50	49,92	47,79	0,16	4,62
300	700	300,8	700,3	0,27	0,04
500	400	500,7	400,09	0,14	0,02
580	780	580,45	779,73	0,08	0,03
50	700	49,92	700,35	0,16	0,05
Promedio				0,16	0,95

De los resultados que arroja esta prueba se puede notar que el nivel de exactitud en la prueba de posicionamiento representa el 99.84% para el eje X y el 99.05% para el eje Y.

8.1.5 Prueba de profundidad de corte en madera.

Para comenzar las pruebas de profundidad de corte, se decidió dejar constante la potencia suministrada por el láser a un 100% que equivale a 80W, partiendo de esto se variara la velocidad decrecientemente de 6000 mm/min hasta alcanzar una velocidad que realice un corte perfecto, así para maderas de espesor de 2, 4, 6 hasta 8 milímetros de espesor, y los datos se tabularan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Profundidades de corte.

Material	Espesor [mm]	Velocidad [mm/min]	Potencia [%]
Balsa	2	4000	15
	4	4000	30
	15	1000	100
Triplex	2	1500	100
	4	800	100
	6	650	100
MDF	3	1000	100
	6	800	100
Cartón	1	6500	50
	5	2500	100

De los datos que se observa en la tabla 4.5 los resultados más sobresalientes son el corte en Balsa de 15 mm a 4000 mm/min a una potencia del 100% (80W), y la lámina triplex de 6 mm a una velocidad de 400 mm/min con una potencia del 100%.

8.2 Pruebas del hardware y software libre.

Las pruebas que realizadas con el hardware y software libre fueron las siguientes:

8.2.1 Pruebas de corte

Para realizar los cortes, se trazó imágenes vectorizadas en el software Inkscape (figura 4.9), la geometría de las figuras a cortar abarca curvas y líneas complejas para constatar el correcto funcionamiento de la máquina.

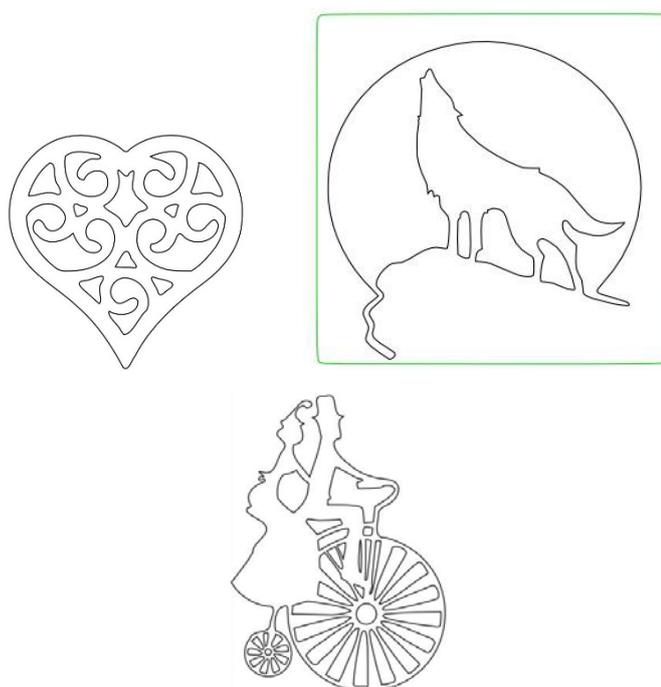


Figura 4.9 Diseño previo en Inkscape para corte.

Luego de tener las imágenes vectorizadas desde Inkscape o cualquier programa CAD que permita generar archivos .dxf, se carga en la aplicación LasaurApp, y envía a cortar; Los cortes realizados fueron ubicados en distintas partes del área de trabajo (1180 mm X 900 mm), estos cortes se puede ver en la figura 4.10.



Figura 4.10 Cortes enviados desde LasaurApp.

Conicidad: el corte se realiza de manera diagonal a la superficie de la pieza, debido a que el haz proyectado desde el lente óptico es cónico. En la figura 4.11 se muestra el corte cónico.

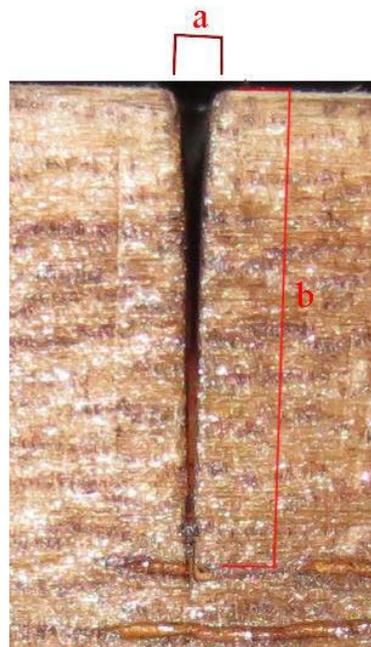


Figura 4.11 Conicidad de corte

Para obtener el ángulo de inclinación se tiene: $a = 1 \text{ mm}$ y $b = 9 \text{ mm}$

$$\tan \varnothing = \frac{0.5}{9}$$

$$\varnothing = \tan^{-1} 0.055$$

$$\varnothing = 3.18^\circ$$

8.2.2 Pruebas de grabado vectorizado

A continuación se realiza una imágenes con relleno vectorizado en el software Inkscape como se puede observar en la figura 4.12.

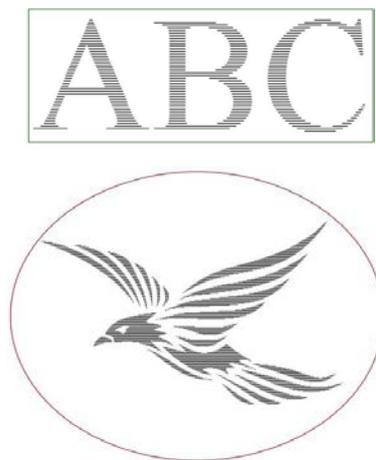


Figura 4.12 Diseño previo en Inkscape para grabado.

El grabado se realizó con una potencia baja, asegurando que el haz del láser no corte la madera, en la figura 4.13 se puede apreciar los diferentes acabados.



Figura 4.13 Cortes de grabado vectorizado.

El manual de usuario para la operación de la máquina láser de CO2 está disponible en el anexo A y el diagrama de flujo del proceso general de funcionamiento de la máquina se puede observar en el anexo C. Se realizó un análisis financiero considerando la inversión realizada que se encuentra en el anexo B.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 Conclusiones.

- El hardware y software libre abre amplias posibilidades para la personalización de entornos e interfaces en sistemas de control de maquinaria CNC, actualmente no existe un software libre suficientemente capaz de grabar complejas figuras en 3D como los software propietarios, pero sus beneficios son importantes como es el bajo costo y fácil adquisición. Cabe mencionar la importancia de realizar un análisis sobre el tipo de controlador (libre o propietario) que posee la maquinaria según la aplicación, necesidad, alcances y limitaciones que el usuario requiera.
- De las pruebas realizadas se afirma que el hardware y software de uso libre al ser implementado como sistema de control funciona en aplicaciones de corte y grabado de madera, y otros materiales afines (MDF, triplex, acrílico, cartón, papel, entre otros), teniendo en consideración los porcentajes de error alcanzados: 0.82% en la prueba de perpendicularidad, 0.56% en la prueba de precisión y 0.95% en la prueba de posicionamiento; se concluye que las guías lineales que se optó construir tienen un nivel de funcionamiento aceptable para la aplicación que van a desarrollar, cabe indicar que existen máquinas que realizan grabado a mayores velocidades pues utilizan guías lineales comerciales que disminuyen los coeficientes de fricción y rodadura.
- La velocidad de trabajo para corte estará en función de las características del material a cortar, siendo el espesor del material fundamental, pues a mayor espesor se necesitará menor velocidad y viceversa; como por ejemplo para cortar una lámina triplex de 2 mm de espesor al 100% de la potencia del láser, se utilizó una velocidad de 2000 mm/min y para 6 mm de espesor una velocidad de corte de 400 mm/min.
- El haz de luz proyectado es cónico, consecuentemente el corte realizado por este es diagonal sobre la pieza; lentes con una distancia focal mayor disminuirían el ángulo de inclinación obtenido de 3.18° .

- Los bordes de la madera tienen una coloración negra debido a la incineración de la misma, al disminuir la velocidad se ocasiona que estos bordes se quemem más, provocando una carbonización en gran medida.
- De los resultados mostrados se asevera la posibilidad de cortar madera con espesores mayores a 5 mm, afirmando uno de los objetivos planteados en este proyecto.
- El haz de del láser pierde energía al incrementarse la distancia entre el punto donde se origina y el punto donde se enfoca para cortar, esto es debido a la presencia de aire en el entorno que rodea al haz de luz durante toda su trayectoria, provocando que el extremo más alejado (1180,900) pierda más energía que en el origen (0,0), está pérdida de energía al ser insignificante no causa problemas durante el corte o grabado.
- De la configuración que se use para los controladores de los motores paso a paso, se alcanzará precisiones más altas, ocasionando una disminución del torque exponencialmente, siendo importante tomar en consideración para diseños futuros a fin de alcanzar mejores resultados y aprovechar los beneficios de los micropasos.

11.2 Recomendaciones.

- En el mercado es posible adquirir guías lineales fabricadas para aplicaciones exclusivamente maquinaria cnc láser, por lo es recomendable para próximos proyectos adquirirlas a fin de disminuir los coeficientes de fricción logrando así aumentar la velocidad.
- Para el sistema motriz es recomendable utilizar relaciones de engranes para obtener mayor resolución y evitar los micropasos que provocan pérdidas de torque.
- En trabajos futuros si se opta por construir una máquina con mayor área de trabajo se debería realizar un rediseño ubicando el tubo láser sobre un eje móvil reduciendo la distancia que haz de luz debe recorrer, de esta manera se garantizaría que la potencia enviada por el tubo láser tendrá una mínima pérdida hasta llegar material a cortar.
- Para regular la proyección del haz de luz entre todos los espejos es necesario contar con elementos de protección para evitar quemaduras como son guantes, gafas, entre otros.

- Encender el extractor de humo antes de empezar a trabajar, para evitar que el humo se adhiera a las diferentes partes de la máquina.
- Al utilizar Inkscape configurar el tamaño del área de trabajo como (1180x900).
- Si se desea grabar o cortar desde un archivo con diferentes valores de potencia o velocidad, este deberá ser creado con diferentes colores para que el programa Lasersaur los distinga y procese.
- Limpiar periódicamente las guías lineales, para evitar atascamientos mientras el sistema se encuentra en movimiento.
- Verificar que el depósito de agua se encuentre siempre casi lleno.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboites, V., & Torres Cisneros, G. (1986). *una introduccion*. Madrid: CIO.
- Barahona Robles, J., & Gregorio, S. (2003). *Introduccion al software libre*. Catalonia: Universidad de Catalonia.
- Cusumano , M. (2004). *The business of Software*. *Free press*.
- Garcia, J. (2000). *La pastilla roja: software libre y revolucion digital*. Madrid: EditLin.
- González, J., & González, I. (2003). *Hardware libre: clasificación y desarrollo de hardware reconfigurable en entornos GNU/Linux*. Madrid: Universidad Autonoma de Madrid.
- Himanem, P. (2001). *La etica del hacker*. California: Destino Libro.
- Lohr, C. (2011). *MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL BORDE CORTADO EN PMMA POR LÁSER DE CO2*. Satiago de Chile: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.
- Mikell, P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*. Mexico: Prentice Hall.
- Ruiz, L. (2004). *El Control Numerico Computarizado en el Desarrollo Industrial*. Portugal: GK.
- Ospina, & Diaz, P. (2005). *Descripción del diseno y construcción de un torno de control numérico*. Nuevo Leon: Ingenieria y Ciencia.
- Vallejo, D. (2007). *SISTEMA DE GRABADO CON LÁSER*. México, D.F.: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

NETGRAFÍA

- Bermejo, R. (2007). *Corte y Soldeo Laser*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de <http://www.iesremedios.es/wp-content/uploads/t-1-12d-rev-1-laser.pdf>
- Berti, S., Roitman, J., & Verrastro, C. (2013). *CONTROLADOR DE MOTORES PASO A PASO MEDIANTE TÉCNICA DE MICROPASOS POR MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO*. Recuperado el 22 de Marzo de 2015, de <http://www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/SDC16.pdf>
- Bricolaje. (2013). *Clasificación de las maderas*. Recuperado el 1 de Febrero de 2015, de <http://blog.briconatur.com/clasificacion-de-las-maderas-maderas-blandas-y-maderas-duras/>
- Castiglione, N. (2011). *Transmisión del movimiento a los ejes de los routers CNC - Router*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2014, de <http://www.revistalettreros.com/pdf/108-034a039.pdf>

- Castro, L. (2010). *Máquina de Corte y Grabado Laser*. Recuperado el 8 de Diciembre de 2014, de http://www.revista-mm.com/ediciones/rev68/maquinaria_laser.pdf
- CNC Machines. (2009). *SELL CNC LASER CO2*. Recuperado el 5 de Enero de 2015, de <http://salecnc.com/catalog / CNC-Laser- Engraving-Cutting-Machine-NEW-1200-x- 900?osCsid=ai8advde28b6vm5tm89v7q4im1>
- Delgado, A. (2002). *Pagina Digital*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2007/2007prim/tecnologia41/hardware-mi-211107.asp>.
- DICOLA, T. (2014). *ADAFRUIT*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de <https://learn.adafruit.com/embedded-linux-board-comparison>
- DISEÑOS DIGITALES. (2010). *Grabado en madera*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de <http://editoriall.blogspot.com/2010/08/un-poquito-de-historia-grabado-en.html>
- Eastern Laser. (2014). *Tube de láser*. Obtenido de <http://www.etlasertech.com.ar/6-1-laser-tube/174842>
- E-CENTRO. (2012). *Grabado en madera, Historia, Técnica*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2014, de http://centrodeartigo.com/articulos-enciclopedicos/article_84700.html
- ECURED. (2011). *ECURED*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de http://www.ecured.cu/index.php/Hardware_libre
- EPILOG. (s.f.). *Sistema de corte láser*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2014, de <http://www.fablableon.org/PDF/Cursos/CursoIntroCorteLaser.pdf>
- Estrems, M. (2004). *Apuntes de Ingeniería de Fabricación*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2014, de Universidad Politécnica de Cartagena: http://www.dimf.upct.es/personal/EA_M/Apuntes%20de%20Ingenier%C3%ADa%20de%20Fabricaci%C3%B3n.pdf
- EUROLASER. (s.f.). *Sistema de corte a laser*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2014, de <http://www.eurolaser.com/es/materiales/madera/>
- FABRICAME. (s.f.). *Corte Laser*. Recuperado el 4 de abril de 2014, de <http://fabricame.com/corte-laser/>
- Galiana, A. (2005). Recuperado el 1 de Febrero de 2015, de <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2005-06/A07%20-%20Sistemas%20Embebidos.pdf>
- Gallardo, P. (2000). *EL GRABADO EN RELIEVE*. Recuperado el 8 de Diciembre de 2014, de <http://www.edicionesgallardoybellido.com/pdf/articulos/articulo%205.%20xilografia.pdf>

- GNU. (2014). *www.gnu.org*. Recuperado el 2 de Febrero de 2015, de <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>
- Gobierno de España. (2015). *Propiedades de la madera*. Recuperado el 1 de Febrero de 2015, de Ministerio de Educación: <http://www.confemadera.es/jovenes-con-madera/alumnos/sostenibilidad-y-medio-ambiente/i/776/335/conoces-las-propiedades-de-la-madera>
- Hechenberger, S. (2014). *lasersaur*. Recuperado el 23 de Enero de 2015, de <http://www.lasersaur.com/manual/lasaurapp>
- Jimenez, K. (2013). *ARQHYS*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2014, de Historia de la madera.: <http://www.arqhys.com/contenidos/madera-historia.html>
- Leadshine. (2015). *EM503 - Advanced Digital Stepper Drive*. Recuperado el 15 de Abril de 2015, de <http://www.leadshine.com/productdetail.aspx?type=products&category=stepper-products&producttype=stepper-drives&series=EM&model=EM503>
- Martinez, I. (2014). *La técnicas del Grabado*. Recuperado el 8 de Diciembre de 2014, de http://www.artecreha.com/Sab%C3%ADas_que/las-tecnicas-del-grabado.html
- Mas, J. (2003). *Software Libre en el Sector Público*. Recuperado el 14 de Marzo de 2015, de <http://www.uoc.edu/dt/20327/index.html>
- MICROMO. (2014). *Microstepping: Myths and Realities*. Recuperado el 22 de Marzo de 2015, de <http://www.micromo.com/microstepping-myths-and-realities>
- Nahum, A. (2009). *Láser de CO2*. Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de http://docencia.izt.uam.mx/mfg/laseres1/material_adicional/co2/pagwebblaseresCO_2.html
- NexLab. (2015). *Oso Beaglebone I/O expansion cape*. Recuperado el 8 de Abril de 2015, de <https://www.nexlab.net/product/osso-beaglebone-io-expansion-cape/>
- NORTD Labs. (2012). *LasersaurMaterialsWiki*. Recuperado el 5 de Enero de 2015, de <https://sites.google.com/site/lasersaurmaterials/wiki/>
- NTN-SNR. (2014). *Direct Industry*. Recuperado el 11 de Enero de 2015, de <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/husillo-bolas-61309.html>
- Pedre, S. (2012). *Sistema Embebido*. Recuperado el 01 de Febrero de 2015, de http://www-2.dc.uba.ar/charladeborrachos/presentaciones/charla_2012-10-12.pdf
- PEREZCAMPS. (2009). *PEREZCAMPS*. Recuperado el 28 de marzo de 2014, de <http://perezcams.com/blog/index.php/distancias-focales-lentes-para-laser-co2/>

- Productos Gearvel*. (2012). Recuperado el 11 de Enero de 2015, de <http://www.gearvel.com.ar/productos/productos.htm>
- ProductosCNC. (2014). *Motores paso a paso*. Recuperado el 22 de Marzo de 2015, de <http://www.productoscnc.es/hyperpages/unintroamotorespap.htm>
- Pyrosisproyect. (2013). *Maquinas, Herramientas y CNC*. Recuperado el 18 de Enero de 2014, de <https://pyrosisproyect.wordpress.com/2011/09/08/por-la-orientacion-del-eje-de-giro/>
- Ramos, M. (2003). *Procesos de Corte*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2014, de http://web.ffmpeg.cl/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=5&view=finish&cid=25&catid=7.
- Rojas, V. (2008). *Grabado Materias*. Recuperado el 8 de Diciembre de 2015, de Universidad de Chile: <http://www.uchile.cl/cultura/grabadosvirtuales/apuntes/grabado.html>
- SERVICIOS GRÁFICOS BRIVIESCA. (2010). *Aplicaciones Laser CO2*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014, de <http://www.servicios-graficos.com/aplicaciones.html>
- Techno Inc. (2010). *Selección entre servo motores y motores a pasos*. Recuperado el 19 de Enero de 2015, de <http://www.techno-isel.com/tic/h834/pdf/h834p041.pdf>
- TROTEC. (2014). *Corte y grabado de madera con láser*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2014, de <http://www.troteclaser.com/ES/Materiales/Pages/Madera.aspx>
- UNAL. (2014). *Máquinas-Herramienta CNC*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/otros/M%20Elquinas%20herramienta%20CNC.pdf
- Urruegos, C. (2008). *MÁQUINAS CONVENCIONALES Vs. C.N.C*. Recuperado el 11 de Enero de 2015, de http://carolinaurregos.blogspot.com/2008/06/maquinas-convencionales-vs-cnc_12.html
- Viscarra, A. (2008). *Grados de Libertad*. Recuperado el 11 de Enero de 2015, de <http://ariel-a-viscarra.blogspot.com/2008/12/grados-de-libertad.html>

ANEXOS