



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Sede Cuenca

Carrera de Ingeniería Electrónica

Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser

Tesis de pregrado presentada a la Universidad Politécnica Salesiana por:

José Gabriel Arpi Trujillo

Diego Román Cabrera Mendieta

Como requisito parcial para optar por el grado de Ingeniero Electrónico

Realizada con la tutoría del Profesor Ing. Julio Zambrano

Cuenca, Enero 2013



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Sede Cuenca

Carrera de Ingeniería Electrónica

TESIS DE PREGRADO

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA
MÁQUINA CNC LÁSER**

por

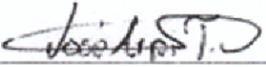
José Gabriel Arpi Trujillo
Diego Román Cabrera Mendieta

Cuenca, enero 2013

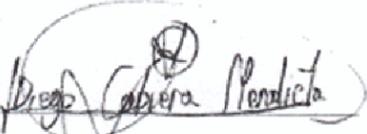
DECLARACIÓN

Nosotros, José Gabriel Arpi Trujillo y Diego Román Cabrera Mendieta declaramos bajo juramento que el trabajo realizado aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



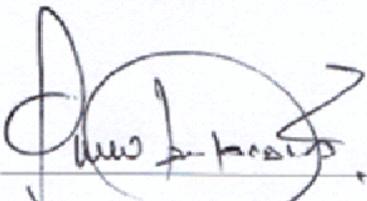
José Gabriel Arpi Trujillo



Diego Román Cabrera Mendieta

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Gabriel Arpi Trujillo y Diego Román Cabrera Mendieta, bajo mi supervisión.



Ing. Julio Zambrano,
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de trabajo de CADITEX, que confió ciegamente en las capacidades de nosotros para el desarrollo del proyecto, y puso a nuestra disposición de manera desinteresada el talento humano y los recursos económicos durante cada fase del trabajo aquí realizado. Al Ing. Adrián Arpi, amigo incondicional, por su gran ayuda al momento de mostrar sus conocimientos y compartirlos con nosotros, mostrando únicamente el interés por la generación de nuevos hitos en el ámbito tecnológico y profesional.

DEDICATORIA

Con la finalización del presente trabajo agradezco a Dios por darme la fuerza necesaria y guiarme siempre por el buen camino y así poder culminar una etapa más de la vida como es la obtención de un título profesional.

De igual manera quiero agradecer y dedicar el estudio realizado en este trabajo a mis padres Patricio Arpi y Pilar Trujillo por brindarme un apoyo permanente y ayudarme a levantar en cada una de mis caídas, a mis hermanos y hermana por brindarme su apoyo y confianza y a cada uno de mis familiares y amigos que han estado presente en cada etapa de mi vida.

José Gabriel.

DEDICATORIA

A Dios y a mi familia, Flor Mendieta, Johanna Cabrera y Milton Cabrera, fuente fundamental de fortaleza y empuje en todos los momentos de mi carrera, en todos los instantes de mi vida entera. Capaces de creen en mí, incluso en los momentos en que nadie, ni siquiera yo he creído. Compañeros inseparables en cada aventura suscitada en el transcurso del camino aquí recorrido, y un agradecimiento especial a Tete Zambrano, por sacrificar tanto y hacerme comprender en todo momento que al momento mas oscuro de la noche le precede siempre el amanecer.

Diego Román.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se tratara sobre la Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser, más una serie de consideraciones que se debe tener presente para el correcto funcionamiento del manipulador.

En el primer capítulo básicamente se centra en un pequeño sondeo sobre el estado del arte del tema a desarrollarse, el cual indica cómo se encuentra la investigación y su desarrollo tanto en las diferentes universidades Ecuatorianas como en las distintas universidades de otros países. También se reviso como se encuentra el desarrollo de este tipo de maquinarias en la parte industrial y comercial, así se tiene una pequeña idea de cómo están construidas mecánicamente y qué tipo de servicio puede brindar al usuario, ya que se tiene una gran variedad de series y modelos de CNC. Todo este estudio realizado muestra que existe un gran interés en la parte investigativa por las universidades y entidades privas que están dedicadas exclusivamente a su desarrollo.

Siguiendo con el capítulo uno se tiene la motivación por la cual se ha elegido “Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser” como tema de tesis para la obtención del título de Ingeniero Electrónico, para finalizar el capítulo se tiene expuesto los objetivos planteados y la estructura capitular de toda la tesis.

En el segundo capítulo se expone la estructura física de todo el sistema, para ello se inicia con una visión general del mismo, en el cual se explica cómo se ha dividido cuidadosamente por bloques a toda la máquina CNC láser, en cada bloque se detalla que requisitos debe cumplir y que trabajo va a desempeñar.

Donde se requiere de un procesador cargado con el sistema operativo Linux por ser determinista y cumplir con ciertas características imprescindibles para la CNC láser, también al ser un sistema que trabaja a altas velocidades es necesario que la comunicación se realice mediante una tarjeta PCI de alta velocidad, el cual sería el protocolo de comunicación más seguro y apto para la aplicación, ya que es la

interfaz por donde se transmitirá todos los datos hacia los drivers o controladores de cada uno de los actuadores como son motores para los movimientos en los ejes XY y la potencia de la fuente láser para los cortes. Los controladores deben ser propios de cada actuador, en el caso de los drivers de los motores brindan la facilidad de configuración para obtener un micro paso, haciendo que el sistema sea más preciso mientras que el controlador de la fuente láser permite controlar la potencia del haz del láser para la profundidad del corte.

Una vez que se tiene claro como está compuesto todo el sistema se puede agrupar o unificar ciertos bloques expuestos en la visión general para conformar módulos, como por ejemplo los bloques de procesador y tarjeta controladora se unifican y se obtiene el módulo de control, así mismo unificando otros bloques se obtiene el módulo de potencia y módulo de actuadores, los cuales son descritos y estudiados más detalladamente en las siguientes secciones del mismo capítulo.

En el tercer capítulo se realiza un estudio cinemático de todo el sistema, para ello se debe tener presente los fundamentos mecánicos para la construcción del manipulador, es decir el manipulador por su forma de construcción y movimiento que puede ejecutar se le clasifica dentro de un tipo de robot como es el cartesiano. También se debe tener presente los tipos de transmisión y reductores que estén presentes en el diseño del mismo.

Como se indico la CNC láser está catalogado como un robot cartesiano por lo que puede mover su herramienta en los ejes XY, al ser cartesiano su análisis cinemático directo e inverso es mucho más sencillo y directo.

El Capítulo cuarto está centrado específicamente en el algoritmo de control y el protocolo de comunicación siendo esto la arquitectura lógica del sistema. En lo que hace referencia al algoritmo de control se detalla los diferentes tipos de generación de trayectorias que se puede implementar cada una con mayor dificultad y precisión, planificador de rutas, la interfaz para la interpretación del código G que es el lenguaje de las máquinas CNC.

En cuanto a lo que es el protocolo de comunicación, como su nombre lo dice, se indica que tipo de protocolo es el más indicado para un sistema de este tipo, donde se opto por el protocolo bus PCI por cumplir con los requisitos requeridos como son transferencia a altas velocidades y gran cantidad de datos, ser determinista y síncrono, siendo estas una de sus características principales.

Para el capítulo quinto se ha realizado las pruebas correspondientes de fun-

cionamiento de todo el sistema, lo que quiere decir, que se hace una lectura de un archivo en código G donde está establecido cada uno de los parámetros como son velocidad y potencia de corte. Primero se realizaron pruebas de trayectorias lineales para ver si cumple con movimientos simples, segundo pruebas de trayectorias circulares para ver la resolución que tiene cada uno de los motores en la combinación de movimientos de los ejes y para finalizar se realizaron pruebas de movimiento combinando las trayectorias anteriores.

El sexto capítulo son conclusiones y recomendaciones donde se analiza como está funcionando el sistema en su totalidad.

Palabras clave: *CNC Laser, Corte Laser, Protocolo bus PCI, Tiempo Real, Generación de Trayectorias*

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Estado del Arte.	1
1.1.1	Máquinas CNC.	8
1.1.2	Características básicas de una CNC láser.	9
1.2	Motivación.	13
1.3	Objetivos y estructura de la tesis.	14
1.3.1	Objetivos planteados.	14
1.3.2	Estructura de la tesis.	16
2	ARQUITECTURA FISICA DEL SISTEMA.	18
2.1	Visión general del sistema.	18
2.1.1	CPU o procesador.	19
2.1.2	Tarjeta controladora.	19
2.1.3	Drivers X/Y.	21
2.1.4	Sensores.	22
2.1.5	Láser.	23
2.1.6	Interfaz humano-máquina.	23
2.2	Módulo de control.	24
2.2.1	Procesador.	24
2.2.1.1	Sistema operativo en tiempo real.	25
2.2.1.2	Requisitos para SOTR	28
2.2.1.3	Características de SOTR.	29
2.2.1.4	Sistemas RTAI.	30
2.2.2	Tarjeta controladora	32
2.2.2.1	Descripción general.	32
2.2.2.2	Configuración de hardware de la tarjeta de control.	33
2.3	Módulo de potencia	38
2.3.1	Tarjeta de expansión.	38
2.3.1.1	Configuración de hardware de la tarjeta de expansión.	40
2.3.2	Potencia láser.	42
2.3.2.1	Fuente láser HY-HVCO ₂ /X.	42
2.3.2.2	Características generales.	42

2.3.2.3	Instrucciones.	44
2.4	Actuadores del proceso.	45
2.4.1	Motores paso a paso.	45
2.4.1.1	Características.	46
2.4.1.2	Tipos de motores paso a paso.	46
2.4.1.3	Ventajas y desventajas.	50
2.4.2	Fuente láser.	50
2.4.2.1	Clasificación.	51
2.4.2.2	Características.	52
3	ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL SISTEMA	55
3.1	Fundamentos mecánicos.	55
3.1.1	Estructura mecánica de robots.	55
3.1.2	Transmisión y reductores.	57
3.1.3	Actuadores y sensores.	58
3.1.4	Elemento final.	59
3.2	Cinemática.	59
3.2.1	Análisis cinemático directo.	61
3.2.2	Análisis cinemático inverso.	61
3.3	Cálculos.	62
3.3.1	Cálculo del análisis cinemática directa.	62
3.3.2	Cálculo Análisis Cinemático Inverso.	64
4	ARQUITECTURA LÓGICA DEL SISTEMA	66
4.1	Algoritmos de control	66
4.1.1	Interfaz e ingreso de datos.	67
4.1.2	Intérprete de código G	68
4.1.3	Planificador de rutas	69
4.1.4	Generador de trayectorias en el espacio cartesiano	71
4.1.4.1	Trayectoria lineal	72
4.1.4.2	Trayectoria trapezoidal	73
4.1.4.3	Trayectoria double-S	75
4.2	Protocolos de comunicación.	82
4.2.1	Tipo de buses de comunicación.	83
4.2.2	Bus PCI.	84
4.2.2.1	Conectores bus PCI.	85
4.2.3	Bus PCI síncrono.	86
4.2.4	Fundamentos del protocolo PCI.	87
4.2.5	Características bus PCI.	89
4.2.6	Tipo de señales del bus PCI.	90

4.2.6.1	Función de señales del bus PCI.	91
5	PRUEBAS DEL SISTEMA	93
5.1	Desempeño del controlador con trayectorias lineales.	97
5.2	Desempeño del controlador con trayectorias circulares.	99
5.3	Desempeño del controlador con trayectorias combinadas lineales y circulares	100
5.4	Desempeño del controlador en corte de texto	102
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diagrama de Bloques de una Máquina CNC.	9
1.2	Motor Paso a Paso [1].	10
1.3	Tarjeta Bus PCI [1].	12
2.1	Diagrama de Bloques de la Estructura Física del Sistema.	18
2.2	Driver para Motores a Pasos.	21
2.3	Sensor Óptico.	23
2.4	Diagrama de Bloques del Procesamiento de Trayectorias.	27
2.5	Arquitectura Micro-Kernel [2].	31
2.6	Arquitectura RTAI con HALL [2].	31
2.7	Arquitectura RTAI con ADEOS [2].	31
2.8	Tarjeta PCI (Super Puerto 5i25).	33
2.9	Fotprint de la tarjeta PCI.	34
2.10	Configuración del conector JTAG.	37
2.11	Configuración del conector HDR26.	37
2.12	Configuración del conector DB25F.	38
2.13	Tarjeta de Expansión.	39
2.14	Fotprint de la tarjeta de expansión.	39
2.15	Esquema de Conexión Lámpara Láser CO2.	44
2.16	Panel de Control de la Fuente Láser.	45
2.17	Esquema del MPP-IP y MPP-RV [1].	47
2.18	Incremento de resolución del MPP-IP y MPP-RV [1].	48
2.19	Motor paso a paso Híbrido [1].	48
2.20	Rotor dividido del MPP-H [3].	49
2.21	Conexión Unipolar y Bipolar [1].	49
3.1	Tipos de Articulaciones [4].	56
3.2	Configuración más frecuente de robots industriales [4].	57
3.3	Desplazamiento con cinemática directa del punto (0,0) al punto (100,200).	64
3.4	Desplazamiento con cinemática inversa de (0,0) pasos, a (25000,35000) pasos.	65

4.1	Diagrama de Bloques del Sistema de Control.	67
4.2	Diagrama de Bloques del Intérprete [5].	69
4.3	Algoritmo de Planeación de Rutas [6].	70
4.4	Ejemplos de posicionamiento.	71
4.5	Categorías en la planeación de Trayectorias [7].	72
4.6	Posición velocidad y aceleración de una trayectoria lineal, ($t_0 = 0, t_1 = 8, q_0 = 0, q_1 = 10$) [7].	73
4.7	Aceleración, velocidad y posición en un perfil de velocidad trapezoidal [7].	74
4.8	Trayectoria Double-S: Posición, Velocidad, Aceleración y Jerk [7].	76
4.9	Posición, velocidad, aceleración y jerk sin alcanzar v_{max} [7].	79
4.10	Diagrama de bloques para la planificación de trayectorias [7].	82
4.11	Conectores para Bus PCI de 32bits y 64 bits [8].	85
4.12	Lectura de señales sincronizadas [9].	87
4.13	Proceso para la sincronización de señales [9].	87
4.14	Ejemplo de arbitración en el bus PCI [10].	88
4.15	Ejemplo de encabezado del espacio de configuración PCI [10].	89
4.16	Pines del PCI [11].	91
5.1	Estructura CNC láser.	93
5.2	Sistema de tracción eje X.	94
5.3	Sistema de tracción eje Y.	94
5.4	Interfaz del Sistema.	95
5.5	Pestañas de la Interfaz.	96
5.6	Trayectorias lineales.	97
5.7	Trayectoria lineal-diagonal.	98
5.8	Trayectorias circulares.	99
5.9	Trayectoria circular.	100
5.10	Ejemplo de trayectoria combinada.	101
5.11	Trayectoria combinada.	102
5.12	Diseño en Corel Drauw.	103
5.13	Parametrización de las trayectorias.	103
5.14	Prueba de corte de texto.	104
6.1	Estructura de la aplicación.	109
6.2	Diagrama de flujo de la HMI	110
3	Diseño pantógrafo.	113
4	Componentes principales.	113
5	Transmisión eje X.	114
6	Transmisión eje Y.	114

7	CNC Láser.	116
8	Tarjeta de expansión.	116
9	Motor del eje X, con su transmisión de engranes 3:1	117
10	Motor del eje Y, con su transmisión de engranes 3:1	117
11	Drivers motores ejes XY.	118
12	Fuente láser.	118
13	Lámpara láser.	119
14	Espejos para el haz del láser.	119
15	Boquilla láser.	120
16	Corte láser en Fomix.	122
17	Corte láser en Papel.	122
18	Corte láser en Trupan.	123
19	Corte de una matriz de 2x2 en trupan.	123
20	Cortes en los diferentes materiales.	124

Índice de tablas

2.1	Procesadores Intel Core 2 Duo.	25
2.2	Configuración Estándar CAT5.	41
2.3	Configuración del Conector TB1.	41
2.4	Configuración del Conector TB2.	42
2.5	Configuración del Conector TB2.	45
3.1	Sistemas de transmisión [4].	58
3.2	Datos Para calculo de la Cinemática	62
4.1	Tipo de señales que maneja un BUS PCI [11].	90
4.2	Señales del Sistema [11].	91
4.3	Señales de Dirección y Datos [11].	92
4.4	Señales de Control [11].	92
4.5	Señales de Arbitraje [11].	92
4.6	Señales de Estado [11].	92
5.1	Velocidades máxima y mínima de los motores XY.	96
5.2	Parámetros de trayectoria lineal.	97
5.3	Resultados de la ejecución de corte lineal.	98
5.4	Parámetros de trayectoria circular.	99
5.5	Resultados de la ejecución de corte circular.	100
5.6	Parámetros de trayectoria combinada.	101
5.7	Resultados de la ejecución de corte combinado.	102
5.8	Parámetros de corte en papel bond.	104
5.9	Resultados del corte de texto.	104

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del Arte.

En la actualidad, existen grandes empresas como Gbos, Fanuc, Iehk, Sale CNC, Viwa S.A, WMW AG, Jiatai Tecnología Láser, entre otras que se encuentran por todo el mundo, las cuales están dedicadas al diseño, fabricación y venta de Máquinas–Herramientas CNC (Control Numérico Computarizado), todas estas empresas se encuentran fuera del país Ecuador.

El control numérico por computadora básicamente es adaptable para cualquier Máquina–Herramienta como Fresadoras, Taladros, Tornos, entre otras máquinas que realicen movimientos de ejes a través de motores, como por ejemplo Cortadoras por Láser, Máquinas para la realizar PCBs y todo tipo de máquina que realice diferentes tipos de movimientos, ya que este tipo de control se enfoca al movimiento de ejes generando trayectorias específicas con una alta precisión.

Uno de los principales inconvenientes para realizar CNC en el país, es la construcción de Máquinas–Herramientas, ya que no se tiene empresas dedicadas a la construcción de las mismas. El principal motivo de no desarrollar diferentes productos en el país, es que aún la mayoría de personas sigue teniendo pensamientos retrogradadas, en que el producto nacional no es competitivo con el producto importado, dando el resultado que empresas como CADITEX, El Hierro, Coral Rio entre otras, importen maquinaria y se dediquen a su comercialización.

El costo de una Máquina–Herramienta CNC depende de varios factores como, área de trabajo, velocidad de trabajo, precisión en los movimientos, capacidad de almacenamiento de diseños, herramienta a controlar y su modelo, siendo estas las características más importantes.

Como ya se menciona, existen diferentes empresas que están dedicadas a la fabricación de máquinas CNC, cada una con sus propias características como se puede ver a continuación.

La empresa Gbos láser está dedicada exclusivamente al diseño y construcción de maquinaria láser, las cuales son totalmente automatizadas, que desempeñan diferentes aplicaciones, a continuación se puede ver el producto que realiza Gbos.

1. Máquina de corte y grabado por láser.
2. Máquina de marcado láser.
3. Máquina de soldadura láser.
4. Interruptor membrana corte/marcado.
5. Marcado de paquete IC.

De cada una de estas máquinas, se puede encontrar diferentes series y modelos las cuales están centradas para un funcionamiento exclusivo, así se cubre diversas áreas de trabajo en la industria.

Como por ejemplo se tiene la máquina de corte y grabado láser, donde se tiene 10 tipos de series, uno de ellos es la Serie D, donde se puede encontrar 4 modelos, la cual es ideal para cortar diferentes materiales, entre ellos se encuentra MDF, madera, acrílico y diferentes tipos de metal; con un láser CO2. En esta serie de igual forma se puede encontrar varios modelos donde se van a diferenciar por la potencia del láser, sistema de alimentación y la automatización.

Para tener una mejor idea de las características y especificaciones de una máquina de corte y grabado por láser, se especificara la serie D modelo D1210. Se caracteriza por tener múltiples modos de transmisión de datos, tubo láser óptico (100w, 120w, 150w), corta diferentes materiales como madera, acrílico y metales con un espesor máximo de 1.5 milímetros, a continuación se puede ver sus especificaciones.

- Tubo: Láser es de CO2 hermético y distante.
- Cabeza del láser: Una sola cabeza de láser.
- Potencia bruta: 1200w.

- Conducción: Motor paso a paso.
- Método de enfriamiento: Refrigeración por agua.
- Área de trabajo: 1200mm x 1000mm.
- Velocidad de corte: 0 - 36000mm/min.
- Sistema de control computarizado de corte automático: Incorporado.
- Fuente de alimentación: AC220/5060Hz Max.
- Peso: 220Kg.
- Dimensión (largo, ancho, alto): 2120mm x 1580mm x 1170mm.
- Requisitos para el medio ambiente: Temperatura 15 °C - 35 °C, humedad 30% - 80%.

Otro ejemplo de producción de Gbos, es la máquina de marcado láser, teniendo una función diferente que la máquina de corte y grabado láser, el marcado láser de igual forma tiene sus respectivas series y modelos de producción entre ellos se puede ver la serie GB donde utiliza una fuente de láser de CO2 el cual no es apto para trabajar con metales y tiene adaptado un escáner de alta velocidad de vibración estos como características generales.

Centrándose en un modelo y serie se ha optado por la serie GB y modelo GB60A, como características como ya se mencionó el láser que está implementado no corta ningún tipo de metal, tiene un escáner de alta velocidad de vibración, lente y tubo de alta calidad de las importaciones láser, en cuanto a los resultados de trabajo brinda una alta precisión a altas velocidades, tiene una gran estabilidad y fácil manejo para el operador, la mesa de trabajo es móvil en el eje Y, esto no quiere decir que se va a perder precisión, las lentes y el escáner ayudan a mantener su alta precisión. A continuación podemos ver sus especificaciones.

- Tubo: Láser de CO2.
- Longitud de onda: 10um.
- Estándar de energía: 60w.
- Potencia bruta: 2500w.

- Método de enfriamiento: Refrigeración por agua o aire de refrigeración.
- Velocidad de grabado de una línea: Mayor o igual a 7000mm/s.
- Profundidad de grabado: Mayor o igual a 3mm.
- Frecuencia de pulso: \leq a 25KHz.
- Velocidad de escaneo: 7000mm/s.
- Precisión de escáner: ± 0.1 mm.
- Carácter mínimo: 0.40mm.
- Mínimo de Ancho le línea: 0,15mm.
- Estilo de marcado: Plano/cilindro.
- Área de trabajo: 300mm x 300mm.
- Extender lente: 3-8 veces (opcional).
- Precisión repetida en posicionamiento: $\pm 0,01$ mm.
- Tiempo de respuesta del eje Z: < 3 ms.
- Fuente de alimentación: 220v 1HP 20A 50/60Hz.
- Peso: 210kg.
- Sistema de refrigeración: 671mm x 555mm x 821mm.
- Requisito para el medio ambiente: temperatura 20°C - 30°C, humedad relativa 30% - 80%
- Dimensión (largo, ancho, alto): 1770mm x 950mm x 1700mm.

Si se desea ampliar información de los diferentes productos que la empresa Gbos se puede ver en su página web www.gboslaser.com.

En cuanto a lo que se refiere a la empresa IEHK, de igual forma es una empresa que está dedicada a la producción de maquinarias, entre ellas se tiene la máquina de corte y grabado láser la cual se va analizar como las anteriores.

Como era de esperarse, IEHK es una empresa que produce una gran variedad de maquinaria, a lo que se refiere máquinas de corte y grabado láser se tiene 11 modelos para cubrir diferentes áreas de trabajo.

Para poder comparar entre un mismo producto de diferentes empresas, se toma como ejemplo la máquina de corte y grabado láser modelo IE1200, se debe tener presente que no se va tener una gran variación en cuanto a sus características y especificaciones, de todas formas se puede ver a continuación.

La EI1200 máquina de corte y grabado láser tiene como características un alto rendimiento y una precisión extrema, tiene un fácil manejo con PC y Software procesamiento de diferentes formatos de datos, puede trabajar con una gran variedad de material como es caucho, plástico, vidrio orgánico, paño, cuero y todo tipo de material no orgánico. El tipo de refrigeración es mediante un enfriador de agua para tubo de enfriamiento por láser.

En cuanto a las especificaciones se tiene:

- Área de trabajo: 1200mm x 900mm.
- Estándar de energía: 60w.
- Velocidad de grabado: 50-60000mm/min.
- Velocidad de corte: 50-60000mm/min.
- Precisión de restablecimiento de posicionamiento: $\pm 0,1$ mm.
- Control de velocidad y de potencia: alta velocidad de control mediante DSP, y el control manual tiene incrementos de 1% al 100%.
- Interfaz: PCI o USB.
- Alimentación: AC220-240v/110/120v, 50-60Hz.
- Profundidad de grabado: 3mm.
- Profundidad de corte: 15 - 20mm acrílico.
- Sistema de ventilación: Escape externo.
- Peso neto: 300kg.
- Requisito para el medio ambiente: Temperatura 0°C - 45°C, Humedad 5% - 96%
- Dimensión (largo, ancho, alto): 1600mm x 1020mm x 990mm.

Como se puede ver entre ambas empresas se tiene especificaciones y características similares, lo cual demuestra que se tiene un gran nivel de tecnología para obtener resultados tan precisos como $\pm 0,1\text{mm}$ en posicionamiento y velocidades de trabajo tan elevadas, para mayor información se puede ver directamente en los catálogos de la propia empresa o en la página web www.iehk.com.

De igual manera se tienen las empresas Fanuc, Sale CNC, Viwa S.A, WMW AG entre otras, las cuales están centradas en la producción de CNC, sistemas de accionamientos y sistemas láser, donde cada uno de sus modelos se caracterizan por el tipo de material con que trabaja y su área de trabajo y muchos factores más como por ejemplo precisión, velocidad y terminado del corte y/o grabado.

Como se puede ver, todas las empresas mencionadas son empresas grandes y se encuentran fuera de Ecuador, dejando así un mercado libre para una producción nacional, lo cual da como resultado el nacimiento de la empresa Suprain convirtiéndose en la empresa pionera en producir en este tipo de Máquinas CNC Láser, la cual se encuentra en la ciudad de Quito, brindando los siguientes servicios:

- Sistema de extracción de gases.
- Corte asistido por aire comprimido.
- Software de fácil uso que se integra directamente en Autocad y Corel Draw.
- Corte y grabado en el mismo trabajo.
- Compatibilidad con varios tipos de archivo: .dwg, .dxf, .ai, .cdr, .jpeg, etc.
- Soporte técnico inmediato.
- Capacitación del personal que utilizara la máquina sin costo.
- Garantía de un año sobre defectos de fabricación.

La empresa Suprarain brinda todos los servicios necesarios como el resto de empresas internacionales, una gran ventaja que posee Suprarain es el Servicio técnico inmediato, lo cual el resto de empresa no lo puede ofrecer por encontrarse fuera del país, y dependiendo de la empresa se puede llegar a perder la garantía de la máquina al salir del país de origen.

Como se puede ver, se tiene empresas que se dedican completamente al diseño, fabricación y venta de CNC Láser, lo cual nos indica que se tiene una gran demanda de producción.

En diferentes Universidades del país y del resto del mundo, se ha visto que se tiene un gran interés por parte de estudiantes, plantear como tema de tesis de grado, el estudio de CNC, en algunos casos se ha realizado su construcción o simplemente estudios e investigaciones, como por ejemplo:

- En el Instituto Politécnico Nacional se realizó:

“Desarrollo de un modelo matemático para incrementar la productividad del torneado con CNC”

- Universidad Nacional de Colombia se ha realizado:

“Software de orientación didáctica de manufactura experimental CNC”

- En la Escuela Politécnica del Ejército se ha realizado:

“Diseño y construcción de una máquina CNC que realiza el ruteo de pistas y el taladrado de circuitos impresos (PCB) de manera automática, utilizando una interfaz gráfica y procesamiento de imágenes en LabVIEW”. “Diseño y construcción de un Router CNC para la fabricación de puertas de MDF”. “Diseño y construcción de un prototipo de torno automático mediante control numérico computarizado CNC”.

- En la Universidad Politécnica Salesiana se ha realizado:

“Diseño y construcción de un taladro XYZ controlado por microcontrolador con interfaz gráfica mediante LabView para la fabricación de circuitos impresos”

Teniendo claro como se encuentra la investigación y desarrollo de una máquina CNC en los diferentes países tanto en la parte de universidades y empresarial, se ve

que es un tema que está en desarrollo, el cual no está saturado refiriéndose a la parte de diseño y construcción para su comercialización, a lo menos si se ve en la parte de Latino América se tiene un gran campo de mercado, por lo que es importante conocer como está constituida una CNC tanto en software y hardware.

1.1.1 Máquinas CNC.

Las Máquinas CNC “Control Numérico Computarizado” tienen como principal característica controlar completamente una Máquina-Herramienta desde un computador mediante un control numérico, facilitando en su totalidad el trabajo a desempeñar. Este tipo de controladores CNC están basados en código G para la generación de las trayectorias, siendo este un código alfanumérico [12].

Al trabajar con el código G, brinda la facilidad a los usuarios de realizar los diseños en diferentes programas CAD, permitiéndoles usar diversos programas computacionales, para luego ser convertido el archivo de formato CAD o DXL en código G con la ayuda del Software CAM [13].

En general la CNC está catalogada en la parte mecánica como máquinas de precisión siendo una de las características más importantes, también se debe tomar muy en cuenta la velocidad de trabajo, esta depende de la aplicación que va a desempeñar por ejemplo, si la máquina es un Torno CNC de la marca “Lab-Volt Modelo 5300” va a desempeñar trabajos de fricción y esfuerzo dando como resultado una velocidad de trabajo de 356mm/min. Mientras que una CNC Láser de la marca “Messer Modelo LaserMat Your L-Class” desempeña un trabajo sin fricción se podría decir que tiene un movimiento libre dando como resultado una velocidad de trabajo de 60000mm/min como se puede apreciar se tiene una gran diferencia en la velocidad de trabajo.

Ya que el control numérico computarizado básicamente es el mismo para cualquier Máquina-Herramienta, se puede generalizar en que está basado una CNC, al final se debe adaptar a los parámetros específicos de cada aplicación como son velocidades mínimas y máximas de trabajo del motor, aceleraciones mínimas y máximas de trabajo del motor, área de trabajo, características propias de la parte mecánica de la Máquina-Herramienta, etc.

Como se mencionó anteriormente, el código G es generado por Software CAM, siendo el único que varía cuando se va a controlar una herramienta como un Láser,



Figura 1.1: Diagrama de Bloques de una Máquina CNC.

el software CAM en este caso, debe tener la opción de manipular la potencia del haz del láser, ya que en la mayoría de diseños no son solo cortes, este puede tener la combinación de corte y grabado en el mismo diseño; mientras que el software CAM para una fresadora está enfocado al movimiento preciso de los ejes y no al control de la herramienta. [14].

Una de las ventajas de las Máquinas CNC es el poder generar trayectorias tan difíciles como sea posible dentro del área de trabajo en tiempos tan rápidos que se les denomina procesos en tiempo real. Cada trayectoria está conformada por datos diferentes ya que los movimientos que se generan están formados por velocidad, aceleración y coordenadas de posición específicas.

A una Máquina-Herramienta CNC se le puede descomponer a muy groso modo en 3 partes como se ve en la *figura* 1.1.

1. Procesador: Debe trabajar con un Sistema Operativo en Tiempo Real donde se realiza todo cálculo para la generación de trayectorias.
2. Tarjeta PCI de Alta Velocidad: Capacidad de comunicarse con el procesador a velocidades de 33MHz para controlar los diferentes drives de los actuadores de la Máquina-Herramienta.
3. Máquina-Herramienta: Es la aplicación que va a desempeñar, este puede ser un Torno, Fresadora, Taladro, Cortadora a Láser o simplemente el control de varios ejes.

1.1.2 Características básicas de una CNC láser.

Al hablar de una CNC Láser solo se está cambiando la aplicación o herramienta que se desea realizar o controlar, ya que el algoritmo del control numérico computacional es lo que varía de una aplicación a otra más el software CAM.

Centrándose en las Máquinas CNC Láser, se puede recalcar que son máquinas que trabajan a velocidades de tiempo real con una muy alta precisión de corte y/o grabado, como toda máquina esta presenta una interfaz muy amigable y fácil de utilizar para los usuario, para lograr la precisión y altas velocidades la CNC láser debe cumplir con ciertos requerimientos como los que se puede ver a continuación entre otros, los cuales se va ir presentando a su debido tiempo.

Uno de los puntos importantes que se debe considerar es la precisión que tiene en el movimiento de los ejes, ya que es lo que entrega la calidad de resolución para cada una de las trayectorias. Para garantizar que la trayectoria que se desea realizar sea lo más idéntica posible a su diseño, se utiliza los Motores Paso a Paso “MPP” siendo los encargados de mover los ejes de la Máquina-Herramienta, los cuales son controlados por pulsos desde el sistemas CNC. La principal características de estos motores es que se los puede controlar cuando sea necesario con Micro-Pasos ayudando a aumentar la resolución en los trazos de las trayectorias, en la *figura 1.2* se puede apreciar un MPP.

En el mercado se encuentran motores de pasos con diferentes resoluciones, estos pueden ser tan precisos que pueden dar pasos con un ángulo menor a 1° o pasos con ángulos de mayores de 15° [15], ya que depende de las características propias de cada MPP, al tener una resolución de menor grado ayuda a mejorar la precisión de la máquina y aún más al realizar micro pasos. Estos tipos de motores trabajan a 3 voltios y consumen 3 amperios.

Existen una gran variedad de MPP, los más utilizados para máquinas CNC Láser son MPP de Reluctancia Variable, MPP de Imán Permanente. Los MPP-RV



Figura 1.2: Motor Paso a Paso [1].

permiten tener mayor velocidad y presentan menor inercia que los MPP-IP, también se tiene MPP Híbridos que es la combinación de los MPP-RV y MPP-IP, siendo el más comercializado por sus características [3].

Dependiendo el enfoque al que se va a desarrollar la CNC se debe escoger los motores de pasos, siendo estos los que van a dar mayor o menor precisión de la máquina, lo cual es ideal para las CNC láser, mientras que para una aplicación de una fresado, torneado, taladrado, se puede implementar motores que brinden mayor inercia, en caso que la aplicación requiera precisión y fuerza se podría utilizar los motores híbridos que son los que brindan la combinación deseada.

Otro de los puntos importantes a considerar es la Fuente Láser, la cual varía dependiendo del material que se desea cortar. La fuente láser de dióxido de carbono (CO₂) es una de las fuentes más utilizadas para la parte de la industria, basada en la tecnología Láser Beam Torch [16].

La mayor parte de las industrias ecuatoriana están enfocadas al corte y grabado en material plástico, sea este para realizar letreros publicitarios o diseños y construcción de piezas plásticas para repuestos. También se tiene empresas que están dedicados a la parte de corte o diseño de logotipos en material textil.

Es muy importante saber cómo va estar colocada la fuente láser, ya que el haz del láser es disparado a un juego de espejos que ayuda a obtener una dirección vertical gracias a diferentes rebotes que se logra internamente. A mayor distancia que recorra el haz este cubre mayor perímetro, lo cual puede ser perjudicial para el proceso, esta distancia debe ser calibrada al momento ser ensamblada en la máquina.

La potencia del láser es controlada de igual manera desde el sistema CNC, dando la facilidad de cortar completamente el material o simplemente realizar grabados en la superficie del material.

Como ya se menciona anteriormente, las máquinas CNC ejecuta procesos tan rápidos que son denominados procesos en Tiempo Real (TR). Para lograr procesos en TR se debe reconfigurar el Sistema Operativo (SO), utilizando las extensiones de tiempo real, siendo Linux el sistema operativo más idóneo para este tipo de desarrollo por ser un SO de libre uso, en el sistema operativo Windows también se lo puede realizar pero no es recomendable, ya que se tiene demasiadas pérdidas de recursos y es un SO compartido lo cual ocasionaría demasiados conflictos [14].

Los sistemas operativos en tiempo real deben cumplir con 5 requisitos para el correcto funcionamiento:

1. Determinismo: Cuando se realiza operaciones en instantes fijos y predeterminados, en intervalos de tiempos predeterminados.
2. Sensibilidad: Se refiere a cuánto tiempo consume el sistema operativo en reconocer una interrupción.
3. Control del Usuario: Es cuando se tiene prioridades a diferentes procesos.
4. Fiabilidad: Controla sucesos que se producen en su entorno a la misma velocidad.
5. Tolerancia de Fallos: Está diseñado para corregir o minimizar al máximo sus fallos antes de continuar con la ejecución del proceso.

Siendo estos requisitos lo que diferencia a un sistema operativo en tiempo real de un sistema operativo compartido [17]

Las tarjetas PCI están basadas en el protocolo de comunicación Bus PCI, que es por donde recibe toda la información de la generación de trayectorias del procesador, se tiene también conectores como puerto paralelo y conector de patillas para el ingresos y salidas de datos como se puede ver en la *figura 1.3*, estos son conectados a los drivers de cada motor, la fuente láser y sensores de control, el protocolo USB no es factible ya que tiene la desventaja que es un protocolo asíncrono el cual no garantiza la transmisión en tiempo real puro [1].



Figura 1.3: Tarjeta Bus PCI [1].

Las tarjetas controladoras como de la *figura 1.3* son tarjetas PCI (Interconexión de Componentes de Periféricos), son denominadas tarjetas de alta velocidad por lo que se pueden comunicar a 33MHZ.

1.2 Motivación.

El principal motivo para la implementación de un sistema de control de una máquina CNC láser, es poner en práctica el conocimiento adquirido en la universidad, y teniendo muy en claro que se va a tener que realizar una investigación en diferentes campos, que de una u otra manera se han revisado levemente o en el peor de los casos no se tiene conocimiento.

El realizar una implementación de esta magnitud sería algo muy satisfactorio tanto personal como para la universidad, ya que son logros que se puede plasmar en la vida profesional y se empieza a relacionar con tecnología de muy alto nivel como es el caso de tarjetas de alta velocidad, modificar sistemas operativos y la propia generación del algoritmo del control numérico computacional para la generación de trayectorias, siendo estos uno de los puntos más interesante para la implementación de todo el proyecto.

Otro de los puntos importantes que motivo el desarrollo del tema planteado, es que después de realizar un pequeño estudio de cómo se encuentra la parte de desarrollo de este tipo de máquinas, tanto en el exterior como dentro del país, dio como resultado que la parte científica de investigación está muy avanzada, lo cual es de gran ayuda para el desarrollo, también se realizo un pequeño estudio de cómo se encuentra la parte netamente de comercialización de CNC láser en el Ecuador, donde se vio que existe solo una empresa "Suprain" que realiza el desarrollo de este tipo de máquinas y el resto de CNC láser son importadas de diferentes países donde se encuentran sus fabricantes.

Al tener una solo empresa que produzca máquinas CNC láser deja abierto un mercado muy amplio, ya que no se tiene saturado dicha producción con producto nacional, mientras con los productos que son importados tienen una gran desventaja, que es la importación, esto implica pagos de impuestos, aranceles, tiempo de entrega y lo más importante no brindan un servicio técnico en caso de sufrir algún desperfecto las máquinas.

El financiamiento completo del tema "Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser" por parte de la empresa caditex; es muy importante ya que muchas de las veces, las tesis de culminación de carrera de ingeniería quedan solo en estudios y simulaciones, ya que la parte de implementación se convierte en el principal inconveniente por el coste que tiene un proyecto de este tipo, lo cual los estudiantes no disponen.

Al tener el financiamiento completo por parte de la empresa caditex, para el desarrollo del tema de tesis, se analizo todos los factores que implica desarrollar una CNC Láser:

- Tener el conocimiento de varios temas entre ellos: Generación de trayectorias, Sistema Operativo en Tiempo Real, Programación en Lenguaje VHDL, Comunicación entre un Procesador y una Tarjeta PCI de Alta Velocidad, siendo esto uno de los temas más destacados.
- Ver si es factible el desarrollo como tema de tesis de grado, para la culminación de Ingeniería Electrónica, ya que el tiempo máximo permitido por la Universidad Politécnica Salesiana para la culminación de una tesis es de 2 años.
- Ver que beneficio se tiene el Implementar un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser en nuestro medio.

Siendo estos los factores principales, para tomar la decisión del desarrollo del tema de tesis planteado, se analizo y se vio que son totalmente realizables y factibles, para demostrar que se puede desarrollar temas de este nivel en nuestro país y ser un país competitivo.

1.3 Objetivos y estructura de la tesis.

1.3.1 Objetivos planteados.

Para el desarrollo de la tesis se planteo como objetivo general "Diseñar e Implementar un Sistema de Control para una Máquina de Control Numérico por Computadora, utilizando una tarjeta madre con sistema operativo Linux, logrando una automatización completa del proceso en tiempo real".

Una vez planteado el objetivo general se establece objetivos específicos, los cuales ayudan a comprender de mejor manera cómo se va a desarrollar el proceso para alcanzar satisfactoriamente la finalización del proyecto. Para ello se ha establecido los siguientes objetivos específicos.

Implementar una tarjeta madre con Sistema Operativo Linux donde se realiza los cálculos para la generación de trayectorias.

- Comunicación de Datos Robusta con los módulos de control.
- Capacidad de almacenamiento diseños.
- Cálculo de las trayectorias en tiempo real.
- Generación de perfiles de movimiento.

Programación de la Tarjeta de Control.

- Generación de Pulsos para los Drivers de Potencia XY.
- Generación de PWM para el Driver de Potencia Laser.

Implementar un Driver de comunicación Tarjeta madre – Tarjeta de control.

- Comunicación en Tiempo Real.
- Comunicación por el puerto PCI.

Implementar un módulo de Interfaz Máquina–Humano con las siguientes características:

- Una Interfaz atractiva para el usuario.
- Fácil manejo.
- Botones de Emergencia.
- Alarmas visibles.

Implementar un Controlador que sea capaz de variar la potencia entregada por la fuente para el disparo del Laser a Tiempo Real en relación con la velocidad, aceleración del movimiento x-y, y de acuerdo a las características del diseño a cortar cargado en el sistema.

1.3.2 Estructura de la tesis.

Para el desarrollo de la Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser, se ha estructurado la monografía en cinco capítulos, donde se hace referencia a todo lo que se debe tener presente para el desarrollo del mismo, más un capítulo de conclusiones y recomendaciones.

En el primer capítulo de Introducción, hace referencia específicamente al Estado del Arte, esto quiere decir, realizar un estudio para ver si existen empresas que estén dedicadas al desarrollo de Sistemas de Control para una Máquina CNC Láser. Como se puede ver, existe una gran cantidad de empresas extranjeras dedicadas al diseño, fabricación y venta máquinas CNC, mientras que en el Ecuador se tiene una empresa dedicada al diseño, construcción y venta de este tipo de máquinas CNC, lo que se puede encontrar en mayor cantidad son empresas que se dedican solo a importar y comercializar.

También se indica en el primer capítulo la motivación del porque se desarrollo el tema de Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser, y cuáles fueron los inconvenientes que se presentaron al momento de plantear el tema.

En el segundo capítulo Estructura Física del Sistema, se plantea una visión general del sistema, indicando rápidamente de cómo está conformado físicamente todo el sistema de control de una máquina CNC láser, para ello se representa a través de un diagrama de bloques, el cual ayuda a indicar como está estructurado el sistema, sus características específicas y qué función desempeña. Profundizando las características constructivas de los módulos de control, de potencia y la parte de actuadores.

El tercer capítulo está enfocado a la parte del Análisis Cinemático del Sistema, el cual estudia los movimientos articulares con respecto a un sistema de referencia absoluto o relativo, se puede dividir al análisis cinemático en análisis cinemático directo y análisis cinemático indirecto.

En el cuarto capítulo Arquitectura Lógica del Sistema de una Máquina de Corte Láser se analizara los sub-sistemas digitales embebidos en el sistema de control numérico por computadora. Los sub-sistemas son divididos por su estructura lógica en Algoritmos de Control y Protocolos de Comunicación:

El capítulo quinto Pruebas del Sistema, hace referencia a pruebas generales de todo el Sistema del Control Numérico por Computadora, desde el ingreso de Diseños como líneas rectas y circunferencias a la CNC, con esto se puede ver cómo está desarrollando el procesamiento para la generación trayectorias y perfiles de velocidad.

Para finalizar se tiene el capítulo sexto, donde se tiene las conclusiones y recomendaciones del comportamiento de cada unas de las etapas del sistema y el comportamiento total de la CNC Láser.

CAPÍTULO 2

ARQUITECTURA FÍSICA DEL SISTEMA.

2.1 Visión general del sistema.

La CNC Láser, tiene como unas de las características principales, realizar procesos tan rápidos que son denominados procesos en tiempo real y, generación de trayectorias tan precisas como sea posible. Para obtener estos resultados, el control numérico por computadora de un cortador láser, está basado como mínimo en un procesador Intel Core 2 Duo con sistema operativo en tiempo real (Linux), una tarjeta PCI de alta velocidad, una interfaz HMI (Interfaz Humano-Máquina), Herramienta a manejar (Láser), los drivers de motores de pasos y sensores. En la *figura 2.1* se puede apreciar de mejor manera la arquitectura física del sistema.

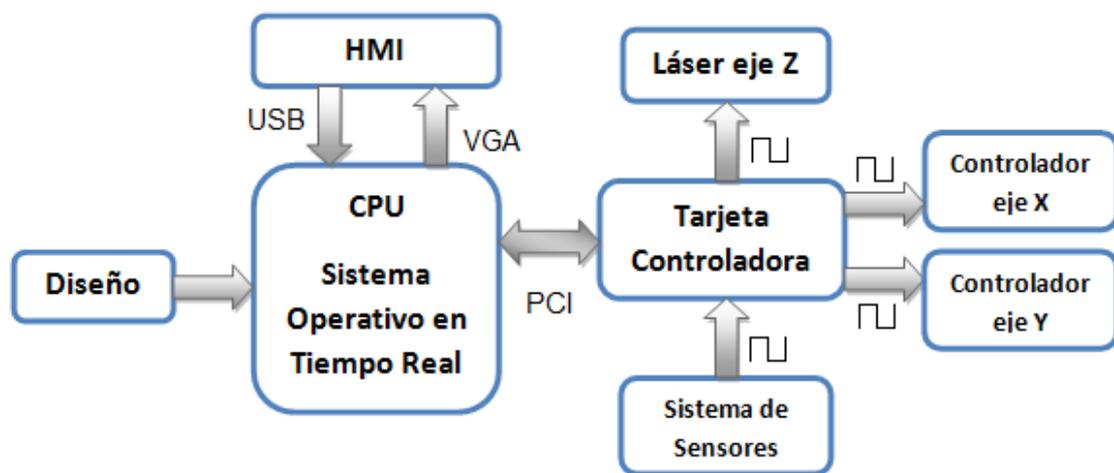


Figura 2.1: Diagrama de Bloques de la Estructura Física del Sistema.

2.1.1 CPU o procesador.

Es la parte principal de todo el sistema CNC, el cual debe cumplir con requisitos mínimos de un procesador básico siendo suficiente para la aplicación que va desempeñar, en caso de querer colocar un procesador con características superiores no se tiene inconveniente (siendo esta una gran ventaja, ya que son fáciles de adquirirlos en el país y son económicos).

En el CPU es donde se realiza la lectura del diseño, procesando todos los cálculos para la generación de las trayectorias, esto implica la generación de perfiles de movimiento, dando como resultado la generación de pulsos tanto para los motores de pasos de los ejes XY y la fuente láser para ser transmitidos a la tarjeta controladora.

Es importante contar con un procesador de buenas características para realizar los cálculos de la generación de las trayectorias demanda una buena capacidad de procesamiento (buena velocidad), lo cual descarta completamente el uso de microcontroladores o FPGA para realizar los cálculos, además que la generación de las trayectorias se debe realizar en tiempo real.

Como se mencionó se debe trabajar en tiempo real, para ello el sistema operativo que va a manejar el CPU, debe cumplir con la característica de procesamiento en Tiempo Real (TR) teniendo como opción Sistemas Operativos como Windows, DOS y Linux como los más conocidos en el medio.

2.1.2 Tarjeta controladora.

La tarjeta controlada, es una tarjeta PCI (Interconexión de Componentes Periféricos) de alta velocidad que desempeña la función de interfaz entre el Procesador y los Actuadores de la máquina-herramienta (Láser, Motores de pasos y Sensores de Alerta).

La información que recibe la tarjeta PCI desde el CPU son trenes de pulsos, los cuales fueron procesados de código G, que es la forma como ingresa la información de los diseños a todo el sistema CNC Láser, a pulsos eléctricos, de igual forma, la información que es enviada por el sistema mecánico (específicamente por los sensores de alerta) son receptados por la tarjeta controladora y enviados al procesador, estas señales en caso de ser detectados indican que el sistema CNC láser ha sufrido algún

desperfecto, ocasionando que se detenga por completo todo el sistema.

La velocidad a la que se transmite la información, del procesador al la tarjeta PCI de Alta Velocidad y viceversa es de 33MHz, que es la velocidad a la que trabaja un procesador de una PC, siendo esta la razón por la que es denominada tarjeta de alta velocidad.

La tarjeta controladora PCI que se está utilizando, está basada en la tecnología FPGA Spartan-6 de Xilinx con una memoria DDR2-RAM, la capacidad de almacenamiento es de 255MB y una velocidad de transferencia de 133MHz. La tarjeta tiene esta característica gracias a que el Spartan-6 tiene como desventaja la falta de memoria interna, ocasionando que se añada la memoria en el diseño de la tarjeta [18]

Una gran ventaja de la tarjeta controladora es que está dividida en dos tarjetas, la principal tarjeta es donde se encuentra el FPGA con la memoria RAM y el Bus PCI y la segunda es una tarjeta de expansión, la cual está conformada por drivers diferenciales de línea para las entradas y salida de datos de los actuadores.

Características principales de los Spartan-6 de Xilinx.

- Proceso de fabricación de 45nm.
- Permite modo de hibernación.
- Tasa de transferencia de hasta 1050Mb/s de datos de pines diferenciales de I/O.
- Controlador programable de corriente a 24mA por pin.
- Una serie de interfaces de alta velocidad: Serial ATA, Aurora, IG Ethernet, PCI Express, OBSAI, CPRI, EPON, GPON, DisplayPort, y XAUI.
- Soporte para memoria DDR, DDR2, DDR3, y LPDDR.
- Las tablas de consulta con 6 entradas.
- Bloques de RAM cada uno de 18Kb, cada uno se puede programar como dos bloques de RAM de 19Kb independientes.

2.1.3 Drivers X/Y.

Continuando con la estructura física del sistema, los drivers XY son los controladores de los motores a pasos para generar el movimiento en los ejes XY, la información que es recibida por los drivers es en forma de pulsos eléctricos, los cuales son plasmados en el movimiento de los ejes trazando las trayectorias de los diferentes diseños.

Los drivers van de la mano de los actuadores (Motores de Pasos), ya que dependiendo de la potencia que tengan los motores estos van a consumir mayor o menor corriente. Para la aplicación de la CNC Láser se ha utilizado el driver IST-301 como se puede ver en la *figura 2.2*.

Como característica de los driver IST-301 es que se puede configurar manualmente tres parámetros importantes como son: 1. Corriente de consumo del motor, la cual es realizada con el procedimiento de **chopping**, el cual está basado en mantener el valor de corriente que circula por las bobinas del motor sin importar el voltaje, dando la posibilidad de incrementar el voltaje para obtener mayor velocidad de giro del motor[1], 2. La resolución del micro-paso y 3. El sentido de giro, como se puede ver en la figura 6, en la parte superior se tiene todas las combinaciones posibles y en su costado se encuentran los switch para su configuración manual. De igual forma en la parte frontal se encuentran los conectores de ingreso y la salida de las señales más el conector de alimentación de 24v.

Los parámetros de corriente y micro-paso dependen directamente del actuador, si los motores a controlar son de mayor potencia, se debe ver si el driver puede soportar dicho consumo, caso contrario se debería cambiar por un driver de mayor potencia; en cuanto a los micro-pasos, su configuración es muy importante y depende bastante



Figura 2.2: Driver para Motores a Pasos.

de la aplicación a la que va a ser empleado, el micro-paso ayuda que un paso normal del motor se le pueda dividir en micro pasos, así se logra tener una mayor resolución y precisión del sistema.

El motor de pasos que se está implementando tiene una resolución de 1.8 grados dando un total de 200 pasos por vuelta. Con la ayuda del driver IST-301 se ha configurado para lograr mejorar la resolución obteniendo como máximo un total de 10000 micro-pasos, y un consumo de corriente de 2.5A.

2.1.4 Sensores.

La parte de sensores está enfocada al posicionamiento de los motores, quiere decir que cada vez que se va a empezar un diseño el sistema CNC debe buscar el punto de inicio, siendo el único indicador de referencia de posición del láser.

Los sensores van ubicados en las rieles de los ejes de movimiento tanto para el eje X como para el eje Y. Cuando el sistema CNC Láser está buscando el punto de inicio, siempre se van a mover los motores en dirección de una misma esquina del área de trabajo, hasta que los sensores detecten que se ha llegado al punto de inicio cada uno de los ejes, estos pueden llegar en tiempos diferentes dependiendo en donde se terminó el diseño anterior.

Cada vez que los dos sensores sean activados van a enviar una señal al procesador indicando que el sistema mecánico de la CNC Láser está lista para empezar con un nuevo diseño.

Como dato curioso las CNC láser solo tiene sensores para indicar el punto de inicio, si se desea tener un sistema más seguro se puede añadir sensores que nos indiquen el área de trabajo, así cuando el sistema por cualquier motivo llegase a perder como mínimo un paso o en el peor de los casos que este mal configurado a lo que se refiere el área de trabajo, estos sensores nos indicarían que el sistema está fuera del área de trabajo, en la *figura 2.3* se puede ver un sensor óptico utilizado para los sistemas CNC láser.

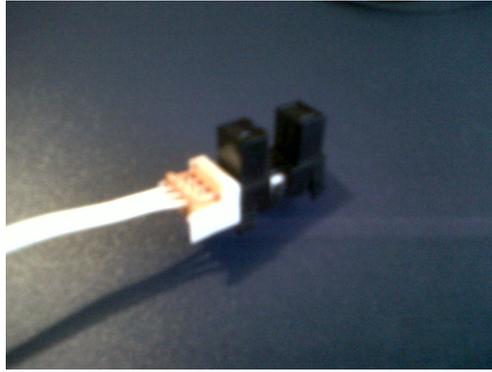


Figura 2.3: Sensor Óptico.

2.1.5 Láser.

De igual manera que los motores a pasos la fuente láser tiene su propio driver, el cual está encargado de convertir la información que es procesada desde el CPU en código G. La información que maneja el láser está centrada en el encendido y apagado de la fuente más la función principal que es el controlar la potencia con la que se desea disparar el haz del láser.

De acuerdo al diseño que se desea realizar, el cual puede tener partes de diseño en el cual se requiera realizar cortes completos sobre el material o simplemente cortes superficiales "grabado en la superficie", por lo que se debe manipular la potencia del haz del láser. En los cortes completos se debe aumentar la potencia dependiendo dicho material, mientras que en los cortes superficiales la potencia se debe disminuir hasta cierto nivel, una de las fuentes láser más utilizadas para CNC son las fuentes de dióxido de carbono CO₂ [16].

La fuente láser va montada sobre los ejes de movimiento XY de manera que el laser pueda realizar los cortes de las trayectorias.

2.1.6 Interfaz humano-máquina.

Para finalizar la estructura física del sistema se tiene la interfaz entre el usuario y la máquina, para ello se utiliza un monitor táctil, en el cual se puede visualizar el diseño que se desea realizar e incluso se puede realizar pequeños modificaciones como asignación y cambios de potencia de las diferentes capas que se tenga en el diseño.

Al hablar de las capas se refiere a los colores asignados en el diseño, cada capa representa un valor del porcentaje de potencia del haz del láser, ya que el diseño puede tener cortes y grabados con diferentes potencias.

2.2 Módulo de control.

La parte del módulo de control se puede dividir en el procesador y la tarjeta controladora, como se menciono anteriormente en el procesador es donde se realizar todo el algoritmo de control, la generación de trayectorias, perfiles de velocidad, interpretación del código G, lectura de la información para visualizar en la pantalla y transmisión de datos para comunicarse con la tarjeta controladora.

El algoritmo para la generación de las trayectorias es realizado en el sistema operativo, el cual debe ser con la expansión de tiempo real, el cual se explica en el capítulo 4, la tarjeta controladora es la encargada de interpretar toda la información enviada por el procesador y ser el interfaz con los actuadores del sistema mecánico.

2.2.1 Procesador.

Como ya se mencionó en la visión general del sistema, el procesador es la parte principal de todo el controlador CNC láser, es el encargado de realizar la parte de cálculo para la generación de las trayectorias y transmitir al siguiente módulo la tarjeta controladora, como se puede observar en la *figura 2.1*.

El procesador al trabajar con un sistema operativo este debe cumplir ciertas características para poder desempeñar su función, lo primero que se debe tener en cuenta es que el SO debe ser un sistema que pueda trabajar en tiempo real SOTR.

- Características de Hardware.

El procesador utilizado es Intel Core 2 DUO, brinda la capacidad suficiente para el desempeño en una CNC, no es recomendable cambiar por un de características inferiores, sería retroceder con la tecnología.

Tabla 2.1: Procesadores Intel Core 2 Duo.

Procesador	Frecuencia	Nombre de Código	FSB	Multiplicador
Core 2 Duo E4200	1600 MHz	Allendale	800MT/s	8x
Core 2 Duo E6300	1866 MHz	Allendale	1066 MT/s	7x
Core 2 Duo E6400	2133 MHz	Allendale	1066 MT/s	8x
Core 2 Duo E6600	2400 MHz	Conroe	1066 MT/s	9x
Core 2 Duo E6700	2667 MHz	Conroe	1066 MT/s	10x
Core 2 Extreme x6800	2933 MHz	ConroeXE	1066 MT/s	11x
Core 2 Extreme x6900	3200 MHz	ConroeXE	1066 MT/s	12x

Intel core 2 duo está basado en una arquitectura de doble núcleo, tiene un desempeño rápido para una ejecución en un menor tiempo, eficiencia energética y un desempeño de multitareas con una mayor capacidad de respuesta.

Está compuesto por un microprocesador fácil de programar, basado y construido con las características de los microprocesadores de generaciones anteriores, una memoria caché L1 de 64KB para cada core, una memoria caché compartida de 4MB siendo un tamaño considerable, en la *tabla ??* se puede ver las características de los diferentes intel core 2 duo.

2.2.1.1 Sistema operativo en tiempo real.

A un Sistemas de Tiempo Real se les denomina, aquellos sistemas operativos que producen resultados correctos en tiempos determinados [19]. El Diccionario Oxford de computación proporciona la siguiente definición de un sistema de tiempo real:

“Cualquier sistema en el que el tiempo en el que se produce la salida es significativo. Esto generalmente es porque la entrada corresponde a algún movimiento en el mundo físico, y la salida está relacionada con dicho movimiento. El intervalo entre el tiempo de entrada y el de salida debe ser lo suficientemente pequeño para una temporalidad aceptable [20]”.

Tomando el termino (temporalidad) como contexto global del sistema, se hace referencia a que, en un sistema CNC Láser, el cual tiene como fin trazar trayectorias de alta precisión, donde los tiempos de respuesta son muy importantes, para tener una mejor idea de los tiempos de respuesta estos se encuentran entre los mili segundos, mientras que en una aplicación de ensamble de piezas, el tiempo de respuesta no es tan importante como en la aplicación anterior, en la ensambladora se puede hablar de tiempos de respuesta que se encuentran entre segundos.

Los principales sistemas operativos más conocidos para desempeñar aplicaciones en tiempo real son los siguientes, y se puede obtener mayor información en [12]:

- El SO de Windows, tiene un gran problema al trabajar con TR ya que su arquitectura está basada en un sistema de tiempo compartido a través de mensajes, para poder solucionar este inconveniente se tiene dos alternativas.
 1. La primera opción y más sencilla es utilizar Hardware adicionales, los cuales son los encargados de la temporización oportuna de los eventos inoportunos, que se produzcan en los diferentes momentos de trabajo, esta solución es la menos recomendada, ya que el instalar un hardware adicional es consumir aun más los recursos del sistema operativo.
 2. La segunda opción es mucho más óptima, primero se debe instalar un núcleo de tiempo real y luego cargar al sistema operativo Windows como una tarea más, así se logra evitar desperdicios de recursos cuando se produzcan eventos irrelevantes como son: Avisos de actualización del mismo sistema operativo, mensajes del antivirus, actualización de aplicaciones o los mismos mensajes del programa Messenger entre otros.

Al trabajar con un sistema operativo que está basado en una arquitectura de tiempo compartido a través de mensajes, no es ideal para desempeñar trabajos en aplicaciones de tiempo real. Las opciones de sistema operativo DOS y Linux son SO basados en una arquitectura de tiempo distribuido, los cuales son ideales para sistemas de Tiempo Real.

- Sistema Operativo DOS, es mucho más accesible ya que sus requerimientos de hardware son muy básicos consume menos memoria RAM ideal para máquinas antiguas. Su reconfiguración es muy sencilla ya que no se debe recompilar su núcleo gracias a su arquitectura modular [12]. Una gran desventaja de DOS es que no cumple con la característica de respuesta ante interrupciones y no es un sistema operativo reentrante, dejando descartado completamente.
- Sistema Operativo Linux, tiene la facilidad de que existe un Sistema Operativo dedicado a lo que es de Tiempo Real (TR-Linux), de igual forma que en Windows se debe reconfigurar su núcleo y tener un gran conocimiento de su código fuente para optimizar a lo máximo, pero la gran diferencia es que Linux como se dijo anteriormente está basado en una arquitectura distribuida siendo ideal para procesos en tiempo real [12].

Conociendo las principales ventajas y desventajas de los diferentes Sistemas Operativos que pueden trabajar en Tiempo Real, se puede ver que el Sistema Operativo en Tiempo Real Linux es el que garantiza un mejor desempeño en aplicaciones como CNC, en la *figura 2.4* se puede observar un diagrama de bloques del proceso de la información en el procesador.

El diseño es ingresado al procesador de la CNC mediante una memoria flash, el cual debe estar en código G para poder ser procesado, ya que este es el lenguaje que maneja la CNC. En el bloque de FIGURAS se le puede modificar ciertos parámetros como es la potencia del láser a través de un interfaz humano-máquina.

Una vez que se ha revisado y configurado toda la información de diseño se empieza a procesar la información, todo este proceso es realizado en Tiempo Real, como se puede ver en la *figura 2.4*, se crea un bucle cerrado entre parametrización, interpolación y perfiles de velocidad para la generación de las trayectorias y datos del láser, una vez terminado el procesamiento de los datos y obtenido los resultados correctos en los tiempos predeterminados, esta información es almacenada en los buffer de memoria RAM y enviada a la tarjeta PCI.

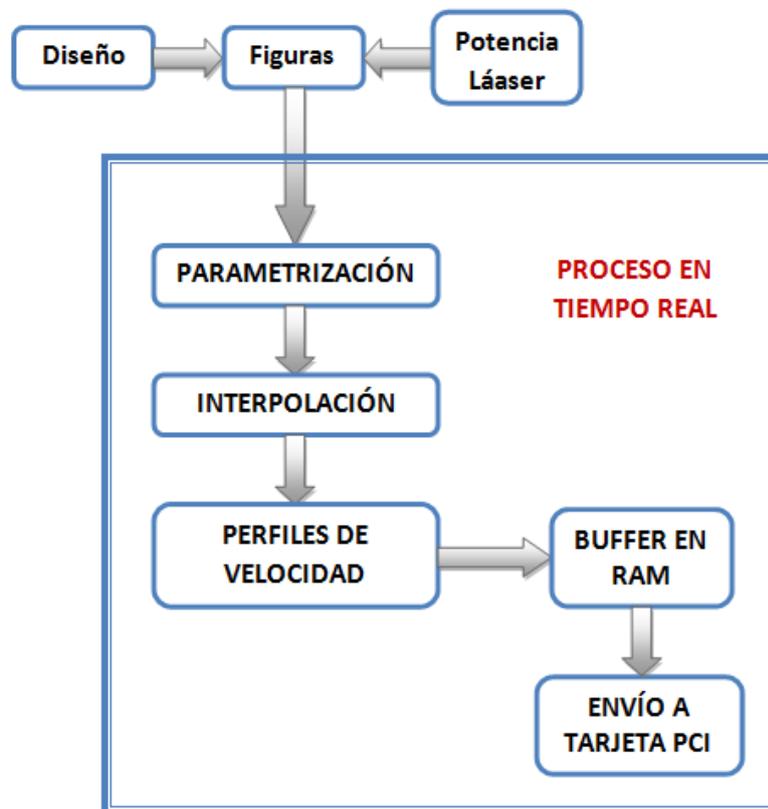


Figura 2.4: Diagrama de Bloques del Procesamiento de Trayectorias.

La información procesada no es enviada directamente a la tarjeta PCI, es necesario almacenar en buffers de memoria RAM ya que no se puede comparar la velocidad de respuesta del sistema de la parte mecánica con la velocidad de un procesador. Los actuadores son muy lentos por lo que se perdería información de las trayectorias dejando un sistema ineficiente.

2.2.1.2 Requisitos para SOTR

Al trabajar con un Sistema Operativo en Tiempo Real (SOTR) como se mencionó en el capítulo 1 debe cumplir con 5 requisitos, cada uno con tareas específicas.

Determinismo: El sistema es determinista cuando se realiza operaciones en instantes y tiempos predeterminados, para que el sistema cumpla con el requisito de determinista depende de la velocidad de respuesta a las interrupciones y la capacidad de atender a todas las peticiones en un tiempo requerido [20].

Sensibilidad: La sensibilidad de un sistema operativo se mide de acuerdo al tiempo en que se demora en reconocer a una interrupción y el tiempo preciso para ser atendida, donde la sensibilidad depende de varios factores [20].

- El tiempo para atender la interrupción desde iniciar la gestión de interrupción y el inicio de ejecución de resolución.
- Si la ejecución de resolución requiere de un cambio de proceso.
- El sistema operativo deja de atender si se produce otra interrupción con mayor prioridad.
- Depende del determinismo ya que entre los dos se produce el tiempo de respuesta para los diferentes sucesos que se producen.

Control de Usuario: El usuario tiene mayor control que en un SOTR que un SO normal, ya que el usuario puede manipular los procesos del sistema, manipular el algoritmo de planificación entre otras opciones más.

Fiabilidad: Debe controlar sucesos que se producen en su entorno y sucesos que se producen en su propia escala de tiempo.

Tolerancia a Fallos: Los SOTR son diseñados para responder a diferentes fallos que se produzcan, tratando de conservar su capacidad máxima y la máxima cantidad de datos. Tratan de corregir el problema o caso contrario tratan de minimizar sus efectos en lo mas que se pueda antes de continuar su ejecución.

2.2.1.3 Características de SOTR.

Para poder cumplir con los requisitos que necesita un sistema operativo en tiempo real, se debe cumplir con varias características como son:

- **Soporte para la aplicación de procesos en tiempo real:** Hace referencia a que el sistema operativo de tiempo real debe proporcionar el soporte adecuado para crear, eliminar y planificar múltiples procesos, teniendo cada uno la posibilidad de monitorear o controlar parte de una aplicación, gracias a que se puede dar prioridades a diferentes procesos o interrupciones.
- **Planificación de prioridad (pre-emptive):** El SOTR cuando este realizando un proceso de menor prioridad debe ser capaz de identificar cuando un proceso de mayor prioridad esté listo para ser ejecutado, lo cual se produce mediante una interrupción, dejando así de realizar el proceso de menor prioridad para ejecutar enseguida el proceso de mayor prioridad, lo cual se hace mediante el determinismo y la sensibilidad que son los encargados de detectar en el tiempo necesario cualquier interrupción gracias al control que tiene el usuario sobre el sistema operativo.
- **Garantía de respuesta ante interrupciones:** La garantía de las respuestas a interrupciones o eventos depende totalmente de que el SOTR esté bien configurado la parte de Determinismo y Sensibilidad, ya que el determinismo es el encargado de identificar las interrupciones y la sensibilidad de tratar de ejecutar lo más pronto posible como se mencionó anteriormente. Estas interrupciones pueden ser de tipo Hardware o Software, por lo que el SO debe ser interrumpible y reentrante.
- **Comunicación Interprocesos:** Los sistemas operativos en tiempo real deben ser capaces de soportar este tipo de comunicación de interprocesos como son semáforos, colas de mensajes y memoria compartida, garantizando fiabilidad y precisión para la sincronización y coordinación de la ejecución de los diferentes procesos, otro de los beneficios de comunicación de interprocesos es la protección de los datos y compartir los recursos.

- **Adquisición de datos en alta velocidad:** Al trabajar con adquisición de conjunto de datos en alta velocidad, el SOTR está configurado para proporcionar los recursos necesarios para realizar un almacenamiento masivo de información en el disco y poder optimizar la parte de almacenamiento, también se tiene la posibilidad de realizar almacenamiento secuencial (asignar bloques de almacenamiento seguido del disco duro), es enfocado a la parte de buffer de E/S.
- **Soporte de Entradas y Salidas:** Este punto es muy importante ya que es el que nos permite tener la comunicación con los diferentes dispositivos que se desea monitorear o controlar, una de las características de este punto es que debe soportar entradas y salidas asíncronas, esto quiere decir que un proceso puede iniciar una operación de E/S y luego continuar sin ningún problema con su ejecución mientras se está ejecutando concurrentemente la operación de E/S.

Teniendo presente todas las características y los requisitos más importantes que necesita un sistema operativo en tiempo real para aplicaciones donde el resultado no es lo más importante si no también el tiempo de respuesta que se demora en entregar el resultado, se tiene sistemas con interfaz de aplicación en tiempo real (RTAI), siendo la evolución de los SOTR.

2.2.1.4 Sistemas RTAI.

Los sistemas RTAI son específicamente para los SO de GNU/Linux, este tipo de sistemas RTAI son capaces de realizar tareas de tiempo real duro (hard real time) siendo su característica principal. Básicamente RTAI es la evolución de RTLinux dando como resultado que el núcleo tiene un núcleo compartido para RTAI y RTLinux [2].

La arquitectura de los sistemas RTAI son basados de la arquitectura micro-kernel, como se puede ver en la *figura 2.5* se muestra como está conformado internamente una arquitectura micro-kernel, siendo un sistema operativo en tiempo real existe una capa que intercepta todas las interrupciones del Hardware para ser ejecutadas las tareas en tiempo real, esto es gracias a las prioridades que se ha otorgado al momento ser configurado, y teniendo como tarea más baja al kernel de Linux como las de menor prioridad.

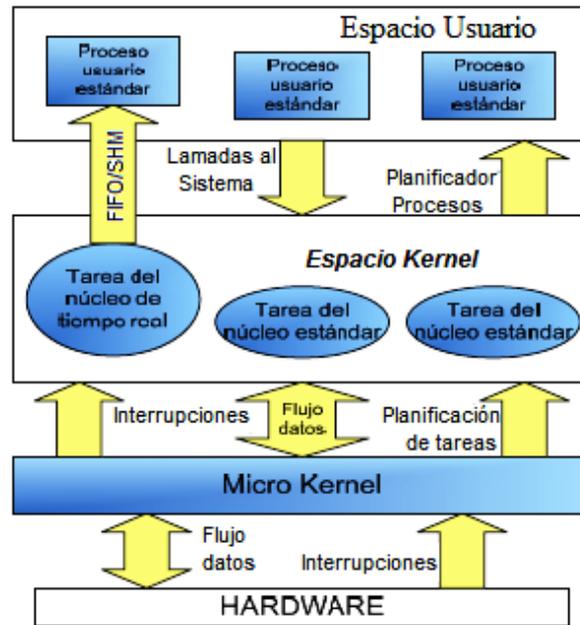


Figura 2.5: Arquitectura Micro-Kernel [2].

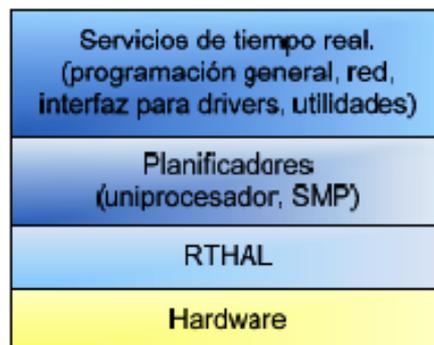


Figura 2.6: Arquitectura RTAI con HALL [2].



Figura 2.7: Arquitectura RTAI con ADEOS [2].

Mientras que la arquitectura de RTAI se puede ver en la *figura 2.6*, a diferencia al micro-kernel en esta arquitectura de RTAI se tiene una capa abstracción de Hardware (HALL) [2]. Sin embargo se ha seguido desarrollando este tipo de arquitectura hasta llegar a implementar la de nano-kernel de ADEOS como se muestra e la *figura 2.7* [2].

2.2.2 Tarjeta controladora

2.2.2.1 Descripción general.

Como se mencionó en la sección de visión general del sistema, la tarjeta controladora debe tener buenas características para poder comunicarse a la velocidad de un procesador de computadora. La tarjeta controladora es una tarjeta PCI de alta velocidad, la cual está basada en la tecnología FPGA, bus PCI y una memoria DDR2 RAM como los principales componentes.

La tarjeta con la que se va a trabajar es Super Puerto 5i25 de mesa electronic, son catalogadas como tarjetas de bajo costo lo cual hace que sean fáciles de conseguir en el mercado, en la *figura 2.8* podemos ver una tarjeta Super Puerto 5i25. La comunicación con los diferentes dispositivos a ser controlados se realiza mediante conectores de peinetas o patillas y un puerto paralelo estándar denominados P2 y P3 respectivamente en el diseño de la tarjeta, el super puerto 5i25 está centrado para el control máquinas-herramientas que realicen algún movimiento de alto rendimiento como son las CNC láser, como principal interfaz de comunicación es el bus PCI que garantiza transmisión de datos con tiempos fiables.

Son denominados como tarjetas PCI universales al 5i25 por trabajar con sistemas a 5v y 3.3v. Al ser tarjetas PCI universales se caracteriza por tener 34 bits de entradas/salidas para propósito general los cuales son 17 por cada conector. Todos los pines de propósito general tienen un bus de switches que proporciona tolerancia de 5v.

Cuando la CPU en la que está conectada la tarjeta PCI se apaga, las entradas/salidas de propósito general se descuentan inmediatamente como protección al sistema, así se evita que la alimentación de la máquina-herramienta se convierta en fuente para la tarjeta lo cual provocaría que las entradas/salidas de propósito general sufran quemadura de los pines o en el peor de los casos se averíe los pines dejando a la tarjeta PCI con un funcionamiento inestable lo cual podría

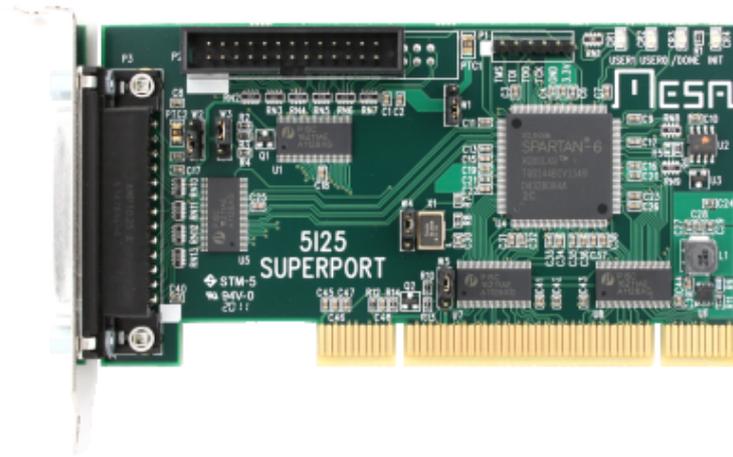


Figura 2.8: Tarjeta PCI (Super Puerto 5i25).

ocasionar diferentes accidentes.

Como dato importante de los pines de entrada y salida de propósito general, los 17 bit que pertenecen al conector de patillas ya tienen definido su estado de activación por estar conectados con resistencias de pull-up, mientras que los 17 bits restantes que pertenecen al puerto paralelo se los puede programar como sea más conveniente para el sistema.

La terminación de pll-up ayuda que la señal transmitida no se distorsione o sea una señal flotante, cuando la longitud de las pistas en la tarjeta es demasiado larga y se maneja señales de alta frecuencia, por lo que se trata de cumplir con las reglas de diseño enfocadas a compatibilidad electromagnética, integridad de señales entre otras más con dicha terminación, la cual es de conectar la resistencia entre el pin que entrega la señal y la fuente de alimentación positiva.

El diseño de las tarjetas 5i25 es compatible con 5 tarjetas de expansión como son 7i74 y 7i78, siendo esta la interfaz entre la PCI y los actuadores, se ha realizado esta división para proteger la parte más sensible como es el FPGA y la memoria en caso de alguna sobrecarga.

2.2.2.2 Configuración de hardware de la tarjeta de control.

- **Opciones de alimentación.**

La alimentación de la 5i25 se realiza mediante el mismo computador siendo car-

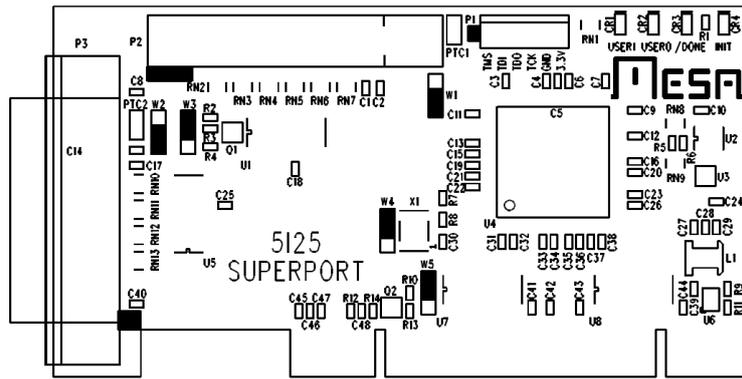


Figura 2.9: Fotoprint de la tarjeta PCI.

característica de la empresa mesa para toda su gama de tarjetas, también se tiene la opción de ser alimentada por fuentes externas mediante cuatro cables paralelos del conector DB25 con los pines (22),(23),(24),(25) siendo pines para manejar corriente alterna, los cuales están deshabilitados por seguridad.

La alimentación de 5v para los dos conectores de entradas y salidas de propósito general se puede realizar individualmente, los cuales están protegidos por dispositivos de PTC por cada conector, asegurando que la tarjeta 5i25 no sufra daño alguno en caso que se produzca un cortocircuito accidental. En la *figura 2.9* se puede apreciar el fotoprint de la tarjeta PCI.

- **Tolerancia de voltaje en las I/O.**

El FPGA que con el que trabaja el 5i25 es un SPARTAN-6 de Xilinx, el cual tiene ingreso de voltaje específico de 4 voltios absoluto como máximo, y la alimentación de la tarjeta es de 5v, por lo que se tiene un bus de interruptores en todos los pines de ingresos y salidas, controlando que no sobrepase el umbral preestablecido.

Al ser tarjetas denominadas de alta velocidad, las señales que maneja son voltajes de 3.3v por lo que se debe desactivar la opción de tolerancia de 5v. Ambos conectores de I/O son controlados por la opción de tolerancia de 5v, dando como resultado, cuando está en alto el modo de tolerancia esta activado y cuando está en bajo se desactiva. W3 es el dispositivo de control (jumper) de la opción de tolerancia 5v I/O y también está encargado de controlar el valor de alimentación de las resistencias de pull-up, cuando está en alto las resistencias son alimentadas con 5v y cuando está en bajo son alimentadas con 3.3v.

- **Configuración del pull-up antes de su activación.**

La 5i25 tiene una debilidad con las resistencias de pull-up de todos los pines de I/O en las acciones de encendido o apagado su fuente de alimentación, por lo que se debe deshabilitar el cambio de estado del W3 al momento que se produzca cualquiera de estas dos acciones, para ello se tiene un jumper de control W4 que está en bajo para deshabilitar a W3 y las resistencias de pull-up no estén con valores de voltaje indeseados.

- **Aislamiento del Bus PCI.**

De igual forma que en los conectores P2 y P3 (ver en la figura 2.9 el bus PCI también tiene un bus de interruptores para controlar la comunicación entre el bus PCI y el FPGA, la operación de desconectar la comunicación es para cuando se desea depurar del firmware del FPGA-PCI. El control es mediante un jumper W5 el cual debe estar en alto para que se establezca la conexión caso contrario en bajo para deshabilitar.

- **Configuración EEPROM.**

Como se ha mencionado la tarjeta 5i25 está compuesta por un SPATAN-6 que tiene como debilidad la falta de memoria para almacenamiento de información, por lo que las tarjetas de MesaElectronic tienen una memoria EEPROM que está conectada directamente con el FPGA. En caso que la memoria sufra algún daño o se necesite depurar la memoria esta tiene un conector JTAG de programación, la memoria puede ser reprogramada con la herramienta de Xilinx.

Otro de los puntos importantes para añadir la memoria al diseño de la tarjeta, es que en el FPGA tiene toda la lógica del bus PCI, y el acceso para la configuración PCI es imposible, por lo que se debe reconfigurar a la EEPROM con la ayuda del conector JTAG con dos archivos de usuario, uno principal y un segundo de reserva, la capacidad de almacenamiento de la memoria es de 8Mbits.

- **Interfaz SPI.**

Es el protocolo de comunicación que se tiene para la configuración de la memoria EEPROM, el SPI (interfaz serial entre periféricos) es utilizado únicamente cuando se desea cambiar la configuración de la memoria. Los dispositivos conectados al bus de comunicación son denominados como maestro y esclavo.

Para determinar el dispositivo que va a actuar como esclavo se tiene una línea de control o selección denominada (Chip select), la cual será activada únicamente cuando se desea comunicarse con un dispositivo que va actuar como esclavo, cada dispositivo tiene su propia línea de Chip select por lo general.

El protocolo SPI es un tipo de comunicación serial full dúplex, cada dispositivo conectado al bus puede transmitir y recibir información. La información es transmitida por tres cables donde, dos líneas son dedicadas a transmisión de datos y la tercera línea es para las señales de reloj.

- **Señales de Reloj.**

tarjeta PCI tiene dos señales de reloj para el FPGA, el primero es el reloj del PCI y el segundo es un cristal de 50MHz que se encuentra en la propia tarjeta. Estas dos señales de reloj pueden ser manipuladas por el FPGA para generar diferentes señales de reloj interno.

Para aplicaciones donde se requiera alto grado de precisión es recomendado utilizar la señal de reloj del cristal de 50MHz, ya que la señal de reloj del bus PCI no tiene la precisión tan alta.

- **Resistencias de Pull-up.**

Las resistencias de pull-up están conectadas a las entradas y salidas de propósito general, estas pueden estar conectadas en diferentes modos como son open drain, open colector o por dispositivos de OPTO acopladores.

Todas las resistencias tiene un valor de 3.3K generando un pull-up de 1.5mA con una alimentación de 5v y un pull-ap de 1mA cuan son alimentados con 3.3v.

- **Configuración de entradas.**

La configuración de entradas del 5i25 está controlada por el firmware de control de HostMot2, siendo una gran ventaja ya que está basado en código abierto y muy flexible para soportar diferentes interfaces para la configuración.

HostMot2 básicamente es denominado un controlador, el cual interconecta su firmware, ofreciendo diferentes módulos como, generadores de PWM pasos y generadores dir (step/dir), el uso general de las entradas y salidas (I/O).

El FPGA es el encargado de ejecutar el firmware de HostMot2 y la interfaz que utiliza para la comunicación con el hardware (motores a pasos) es el bus PCI.

- **Diagrama de Conectores P1, P2 y P3.**

Conector JTAG (P1).

Conector JTAG	
Pin	Función
1	TMS
2	TDI
3	TDO
4	TCK
5	GND
6	(+) 3.3v



Figura 2.10: Configuración del conector JTAG.

Conector de Patillas HDR26 (P2).

Conector HDR26			
HDR Pin	Función	HDR Pin	Función
1	IO17	2	IO18
3	IO19	4	IO20
5	IO21	6	IO22
7	IO23	8	IO24
9	IO25	10	GND
11	IO26	12	GND
13	IO27	14	GND
15	IO28	16	GND
17	IO29	18	GND o 5v
19	IO30	20	GND o 5v
21	IO31	22	GND o 5v
23	IO32	24	GND o 5v
25	IO33	26	GND o 5v

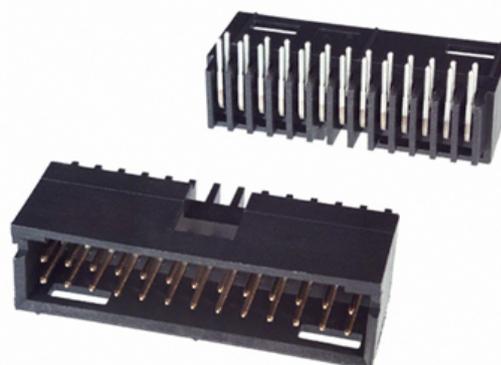


Figura 2.11: Configuración del conector HDR26.

Conector de Puerto Paralelo DB25F (P3).

Conector DB25F (Puerto Paralelo)			
DB25F Pin	Función	DB25F Pin	Función
1	IO0	14	IO1
2	IO2	15	IO3
3	IO4	16	IO5
4	IO6	17	IO7
5	IO8	18	GND
6	IO9	19	GND
7	IO10	20	GND
8	IO11	21	GND
9	IO12	22	GND o 5v
10	IO13	23	GND o 5v
11	IO14	24	GND o 5v
12	IO15	25	GND o 5v
13	IO16		



Figura 2.12: Configuración del conector DB25F.

2.3 Módulo de potencia

El módulo de potencia se divide en dos partes, primero en la tarjeta de expansión la cual es parte de la tarjeta controladora y segundo en el modulo de potencia de la fuente láser, siendo los que está directamente conectados con los actuadores del sistema.

2.3.1 Tarjeta de expansión.

La tarjeta PCI necesita una tarjeta de expansión como la que se puede ver en la figura 2.13 que es básicamente la interfaz para la comunicación con los drivers de los actuadores.

La tarjeta que se implemento es la 7i78 de MesaElectronic, maneja señales hasta 5v y drivers de 24mA, todas las salidas están conectadas al driver de línea en modo diferencial para evitar el ruido. Está compuesta por un bloque de conectores de terminal de tornillo de 3.3mm como se puede ver en la *figura 2.13*, en la *figura 2.14* se puede ver el fotprint de la tarjeta de expansión.

La 7i78 está diseñada para una comunicación con la tarjeta PCI para 4 ejes con una interfaz de buffer direccionados codificados, está compuesto por el conector principal RS-422, y las salidas están manejadas por drivers de línea diferenciales como protección.

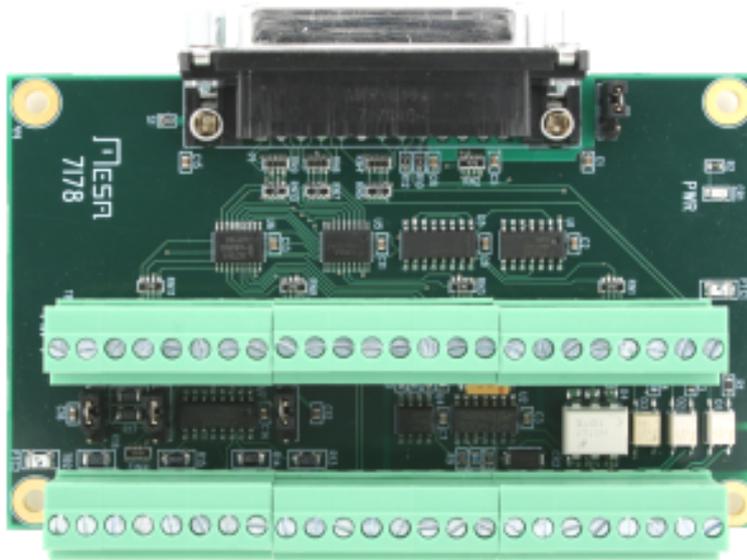


Figura 2.13: Tarjeta de Expansión.

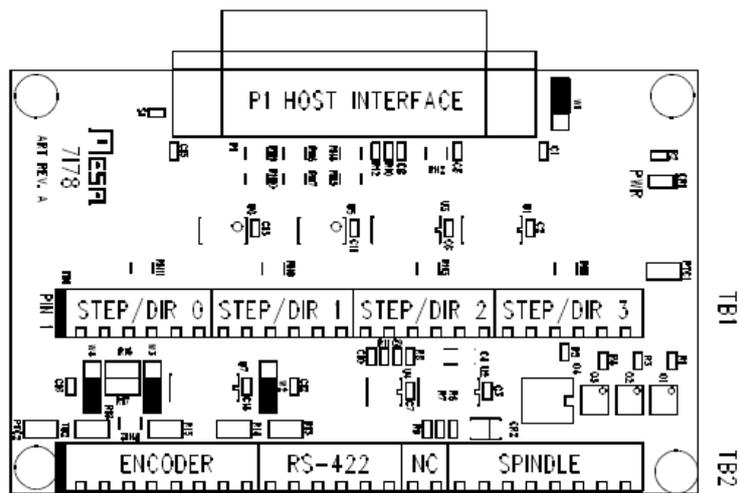


Figura 2.14: Fotprint de la tarjeta de expansión.

2.3.1.1 Configuración de hardware de la tarjeta de expansión.

- Alimentación.

La tarjeta 7i78 puede ser alimentada por dos métodos los cuales deben estar sincronizados al momento de su funcionamiento, esta puede ser alimentada por la tarjeta 5i25 mediante un encoder con interfaz serial de 5v, el cual está controlado por un switch W1, también se puede alimentar a la tarjeta mediante el conector DB25.

Cuando el W1 está en la posición de mano izquierda quiere decir que la energía va ser suministrada por la tarjeta FPGA, caso contrario si W1 está en la posición mano derecha la energía va ser suministrada por el cable DB25 a través de los 4 cables que se menciono en la configuración de hardware de la tarjeta controladora.

- Encode en Modo de Entrada.

El encoder puede ser configurado para trabajar en modo diferencial o en modo simple de terminación, el cual está controlado por los switch W2, W3 y W4. Cuando los tres switch se encuentran en la posición de mano derecha el encoder trabaja en modo diferencial, y en la posición de mano izquierda el encoder trabaja en modo unipolar o TTL.

Los tres switch puede trabajar en modo de grupo o individualmente, cada switch está encargado de controlar una entrada definida como son, W2 controla a la entrada Z o entrada de índice, W3 controla a la entrada B y W4 controla a la entrada A, siendo A y B modos de entrada.

- Interfaz de Host.

La tarjeta de expansión 7i78 está diseñada para operar con una tarjeta basada con la tecnología FPGA como es la 5i25 la cual utilizan el protocolo de comunicación de puerto paralelo RS-422 como se menciono en la sección anterior la 5i25 soporta PWM, ste/dir, encoder entre otros módulos más, la tarjeta FPGA puede funcionar como fuente de alimentación de 5v para la tarjeta de expansión.

- Interface pasos/dirección (step/dir).

Es la encargada de transmitir la información a los cuatro canales que se tiene en la tarjeta 7i78 para el control de los actuadores, son salidas de paso y dirección, con interface de búfer de 5v para señales diferenciales, al ser diferenciales permiten trabajar en ambientes más ruidos.

- Interfaz RS-422.

La tarjeta 7i78 tiene dos módulos de conectores denominados TB1 y TB2 como se puede ver en la *figura* 2.14, para TB2 se tiene una interfaz RS-422 la cual está destinada a las entradas y salidas de expansión, la forma recomendada de conectar este módulo es construirse un cable que siga los estándares de CAT5 o CAT6, como se puede ver la *tabla* 2.2.

Tabla 2.2: Configuración Estándar CAT5.

TB3 PIN	7I78 Señales	Dirección	CAT5 Pines	CAT5 568B Color
15	GND	FROM 7I78	4,5	Azul/blanco
15	RX+	TO 7I78	6	Verde
17	RX-	TO 7I78	3	Verde/blanco
18	TX+	FROM 7I78	2	Naranja
19	TX-	FROM 7I78	1	Naranja/blanco
20	+5VP	FROM 7I78	7,8	Marrón/blanco

- Conectores.

Por el conector TB1 se obtiene los datos de dirección y paso para los actuadores, está conformado por cuatro conectores de tornillo una para cada eje o actuador a manipular, cada conector es de 6 canales dando un total de 24 canales, en la *tabla* 2.3

Tabla 2.3: Configuración del Conector TB1.

TB1 PIN	Señales	TB1 pines	Señal
1	GND	13	GND
2	Paso 0-	14	Paso 2-
3	Paso 0+	15	Paso 2+
4	Dirección0-	16	Dirección2-
5	Dirección0+	17	Dirección2+
6	+5VP	18	+5VP
7	GND	19	GND
8	Paso 1-	20	Paso 3-
9	Paso 1+	21	Paso 3+
10	Dirección1-	22	Dirección3-
11	Dirección1+	23	Dirección3+
12	+5VP	24	+5VP

El conector TB2 está construido de forma similar que el TB1, la única diferencia es que TB2 tiene tres conectores de 8 canales y va a manejar diferentes señales como son, encoder, RS-422 y conector de eje ver la *tabla* 2.4.

Tabla 2.4: Configuración del Conector TB2.

TB1 PIN	Señales	TB1 pines	Señal
1	ENCA+	13	RS-422 TX-
2	ENCA-	14	+5VP
3	GND	15	NC
4	ENCB+	16	NC
5	ENCB-	17	SPINDLE-
6	+5VP	18	SPINDLE OUT
7	IDX+	19	SPINDLE+
8	IDX-	20	NC
9	GND	21	SPINDLE ENA-
10	RS-422 RX+	22	SPINDLE ENA+
11	RS-422 RX-	23	SPINDLE DIR-
12	RS-422 TX+	24	SPINDLE DIR+

2.3.2 Potencia láser.

Existen diversos modelos de fuentes láser para el corte y grabado de materiales, uno de los más utilizados es el láser generado por CO₂ por la potencia máxima que puede alcanzar.

2.3.2.1 Fuente láser HY-HVCO₂/X.

La fuente láser HY-HVCO₂/X como su propio nombre lo dice, utiliza como fuente de alimentación CO₂ para la generación del haz del láser, de acuerdo al material con el que se desea trabajar su potencia máxima de construcción varia.

Donde X nos indica la longitud de onda del haz del láser, CO₂ es la fuente de alimentación para la generación del haz del láser y HY-HV es el modelo.

2.3.2.2 Características generales.

La fuente láser puede ser alimentada a 110AC o 220AC por lo que se debe especificar al momento de hacer la compra.

De acuerdo al modelo de la fuente, este puede generar un voltaje máximo de salida de 28kv, 35kv, 40Kv y la corriente máxima de salida generada es de 23mA, 28mA y 38mA, en corriente directa. El voltaje máximo y la corriente máxima generados están en función de la longitud de onda del haz del láser.

La longitud de onda para los datos mencionados son los siguientes:

MM HY-HVCO2/1.2 70w = 28kv - 23mA. MM HY-HVCO2/1.6 80w = 35kv - 28mA. MM HY-HVCO2/1.2 130w = 40kv - 38mA.

- Aislamiento del voltaje disruptivo.

Ingreso-Salida, ingreso-carcasa: AC 2000v - 10mA - 60s, el polo negativo de salida está conectado en la carcasa.

- Protección.

Con una buena instalación de carcasa a tierra, el circuito de salida de fuente de alimentación puede estar encendido por pequeños periodos de tiempo, se debe evitar completamente el contacto entre el polo positivo y la carcasa, se produciría un cortocircuito directo.

- Tiempo de Respuesta.

El tiempo de respuesta es menor o igual a 1ms, el cual es medido desde el momento que es alimentado.

- Control de nivel de tensión con TTL.

Se tiene un control de nivel de tensión eficaz el cual se puede ajustar en alto o bajo.

- Switch de protección.

Es utilizado para la detección del agua de refrigeración, para la protección del dispositivo láser, o activación con la carcasa.

- Control de la potencia del láser.

La potencia del láser se puede regular por dos métodos, el primero es con la variación de la corriente de salida de la fuente de alimentación con la ayuda de la resistencia variable, el segundo método es con señales de PWM (la magnitud debe estar en el nivel de TTL).

2.3.2.3 Instrucciones.

- Conexión de la lámpara láser.

El terminal positivo del dispositivo láser CO₂, es conectado con el terminal de alto voltaje de HY-HVCO₂/X que es la fuente de alimentación, mientras que la salida del dispositivo láser CO₂ es conectado al polo negativo del circuito de corriente, para esta conexión se puede utilizar un amperímetro o realizar la conexión directamente, en la *figura 2.15* se puede ver un esquema de conexión.

- Conexión del control de señales.

Como se mencionó anteriormente la fuente láser se puede configurar para niveles altos o bajos mediante reguladores TTL, en la *tabla 2.5* se puede ver la configuración y en la *figura 2.16* se puede ver los terminales del tablero de control.

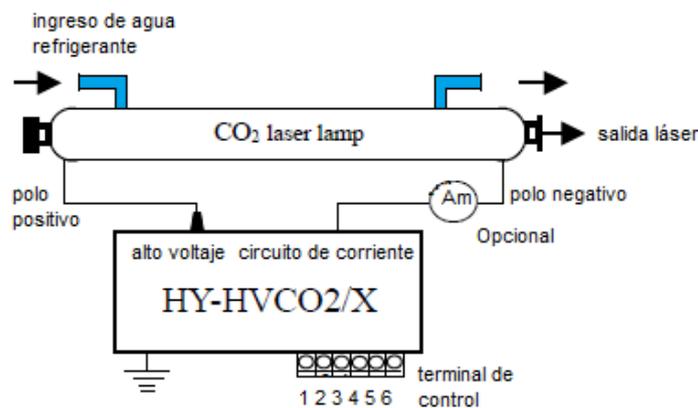


Figura 2.15: Esquema de Conexión Lámpara Láser CO₂.

Tabla 2.5: Configuración del Conector TB2.

Ingreso TTL-H	Ingreso TTL-L	Control de ingreso DAC	Potencia de salida láser
NC	Bajo ($< 0.3v$)	0-5v	P min - Pmax
	Alto ($> 3v$)	0-5v	0
Bajo ($< 0.3v$)	NC	0-5v	0
Alto ($> 3v$)		0-5v	P min - Pmax
Interfaz de protección - Circuito abierto		0-5v	0

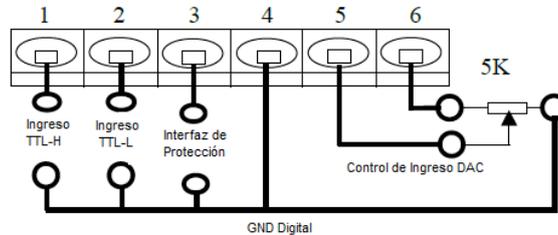


Figura 2.16: Panel de Control de la Fuente Láser.

2.4 Actuadores del proceso.

En el sistema CNC láser tiene únicamente dos tipos de actuadores, los motores de pasos que van a generar el movimiento de los ejes XY y la herramienta a manipular para los cortes y grabados que es el láser CO2.

2.4.1 Motores paso a paso.

El actuador motor paso a paso también conocido como “motores de movimiento indexado” o simplemente “motor de pasos” [15], son considerados como motores de alta precisión gracias a sus características constructivas, como se mencionó en el capítulo 1, estos pueden llegar a ser tan precisos como sean posibles, lo cual hace que sean idóneos para aplicaciones de movimiento con alto grado de precisión y velocidad como son en las diferentes máquinas CNC.

Como bien se sabe los motores de movimiento indexado son considerados como, convertidores electromagnéticos incrementales [14], estos al recibir información en forma de tren de pulsos eléctricos, el motor realiza la acción de movimiento angular de su eje. Al ser motores de pasos, cada pulso nos indica un paso con un ángulo de giro, el tamaño del paso varía de acuerdo a las características constructivas, como cualquier motor de corriente continua este puede girar en sentido horario o anti horario.

Una de las principales características de los motores de pasos, como ya se mencionó es su precisión, lo que permite posicionar al eje del motor de acuerdo al número de pasos dados; a más de poder controlar su posicionamiento, también se puede controlar la velocidad de paso, el cual es directamente proporcional a la frecuencia de variación del tren de pulso eléctrico que llega a las bobinas del motor. Como cada paso es independiente (no depende del paso dado o del paso que va a dar) estos actuadores son ideales para trabajar en sistemas que no tienen una retroalimentación.

El motor de paso que se está implementando tiene un ángulo de giro de 1.8 grados, esto quiere decir que, para dar una vuelta completa (una revolución de 180 grados) se tiene que dar 200 pasos. Como se indico, los controladores para los motores de pasos tienen la capacidad de dividir al paso original en micro-pasos para obtener una mejor resolución.

2.4.1.1 Características.

Centrándose en el funcionamiento de los motores paso a paso se tienen una característica técnica, la cual se debe tener muy en cuenta, al momento de incrementar la velocidad del motor, el par o torque que presentaba inicialmente va ir disminuyendo, este efecto es conocido como resonancia a altas velocidades [15].

Como el motor de movimiento indexado está construido con varias bobinas dependiendo si es unipolar o bipolar, al aumentar la velocidad de giro, las bobinas no se van a cargar por completo haciendo que la señal de pulso disminuya, es decir la duración del pulso va a ser menor y las bobinas no se energizan completamente perdiendo su torque.

No podía faltar la característica principal que son motores de alta precisión, esto se da gracias al principio de funcionamiento y control de excitación de las bobinas con las que está construido.

2.4.1.2 Tipos de motores paso a paso.

Como ya se mencionó en el primer capítulo los motores de pasos se pueden clasificar según su principio de funcionamiento, a continuación se detalla sus características.

- Motor paso a paso de imán permanente.

Los Motores Paso a Paso de Imán Permanente MPP-IP tienen el rotor magnetizado y completamente lizo como se puede ver en la *figura 2.17 (a)* siendo el rotor un imán permanente de hierro dulce y es polarizado, siendo esta la estructura interna del motor para la obtención del ángulo de cada paso.

Para mejorar la resolución del motor se tiene tres opciones, la primera es aumentar los polos en el rotor, la segunda es aumentar el número de fases y la tercera es incrementar el número de bobinas por fase como se puede ver en la *figura 2.18 (a)*.

El rotor al ser un imán permanente con polos definidos, presenta un torque para alinear los polos del rotor y estator provocando posiciones de descanso cuando está sin excitación el estator.

- Motor paso a paso de reluctancia variable.

Los Motores Paso a Paso de Reluctancia Variable MPP-RV tiene la misma estructura que los MPP-IP, lo único que varía es la forma del rotor en este caso es dentado como se puede ver la *figura 2.17 (b)*, cuando las bobinas son energizadas los polos se magnetizan y atraen a los dientes del rotor buscando la menor distancia entre el estator y rotor, dando el nombre de reluctancia variable.

De igual manera que en el caso del MPP-IP se puede mejorar la resolución con tres opciones, la primera es aumentar el número de dientes en el rotor, la segunda incrementar las fases y la tercera es aumentar los polos por cada fase como se puede ver en la *figura 2.18 (b)*.

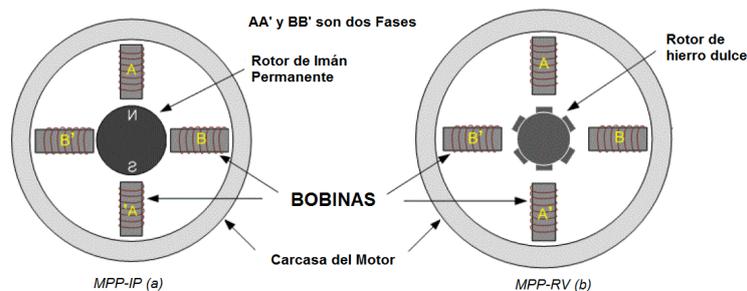


Figura 2.17: Esquema del MPP-IP y MPP-RV [1].

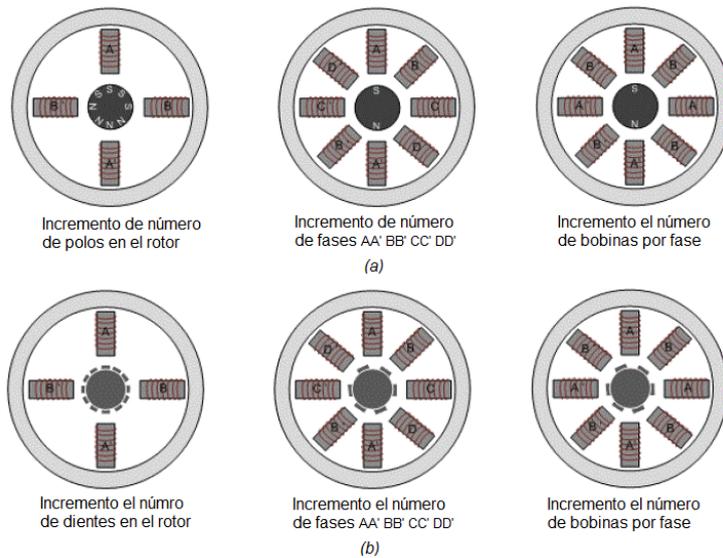


Figura 2.18: Incremento de resolución del MPP-IP y MPP-RV [1].

Cuando el motor no es energizado se pierde totalmente la inercia del motor dejando girar libremente y perdiendo la posición.

- Motor paso a paso híbrido.

Como su nombre lo dice el motor paso a paso híbrido MPP-H, es la combinación de los dos motores analizados, dando como resultado un rotor dentado y magnetizado, mejorando su precisión con un ángulo de 0.9 grados y aumentar su torque, en la *figura 2.19* se puede ver su estructura interna.

Una de las características de los motores híbridos es que su rotor lo tiene dividido en dos partes y desfasado como se ve en la *figura 2.20*, lo cual hace que se pueda dar un paso completo o medio paso según como se excite las bobinas del estator. En

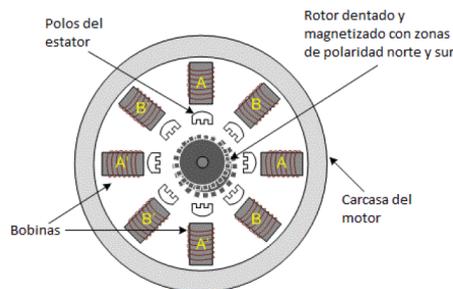


Figura 2.19: Motor paso a paso Híbrido [1].

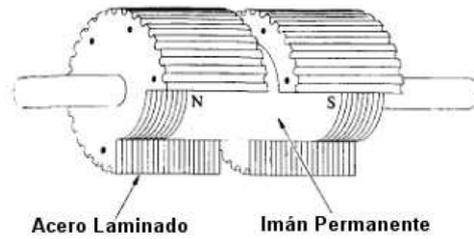


Figura 2.20: Rotor dividido del MPP-H [3].

cuanto a los motores unipolar y bipolar son clasificados por su conexión y no por su construcción.

- Motor paso a paso de unipolar.

Su conexión es muy fácil, cada eje del estator posee dos bobinas dando devanados duplicados como se puede ver en la *figura 2.21 (a)* al tener duplicado los devanados se facilita el circuito de control, siendo la conexión más común el unir los puntos medios de los devanados y conectar al positivo de la alimentación y el resto de extremos de los devanados se conecta a tierra en forma secuencial y ordenada para lograr el giro adecuado.

- Motor paso a paso bipolar.

Al no tener el doble bobinado se debe alimentar de forma alternada las bobinas del estator, por lo que se requiere un circuito de control más complicado que el anterior. En la *figura 2.21 (b)* se puede ver un motor con conexión bipolar. Por su configuración ofrecen un mejor torque al momento de estar energizados y como dato importante son más livianos.

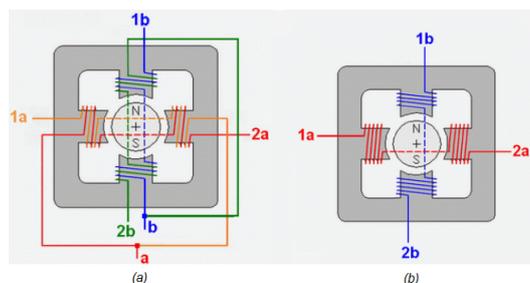


Figura 2.21: Conexión Unipolar y Bipolar [1].

2.4.1.3 Ventajas y desventajas.

Como todo dispositivo o herramienta de trabajo los motores de pasos presentan sus ventajas y desventajas al momento de su aplicación.

Ventajas [1]:

- Alta repetitividad al momento de posicionar el eje del motor.
- Al ser contruidos sin escobillas, se tiene un mayor tiempo de vida útil.
- No genera chipas lo que da un mayor campo de trabajo como es en lugares inflamables.
- Son precisos para aplicaciones con sistemas sin retroalimentación, se evita de sensores o encoders abaratando los costos.
- Pueden frenar estando en velocidades muy altas manteniendo al rotor en una posición determinada con un torque elevado.
- La velocidad de giro no depende de la carga aplicada.

Desventajas [14]: La única desventaja que se ha encontrado en los motores de pasos, es el error que se produce al momento de dar un paso que es del 5% aproximadamente, pero se debe tener en cuenta que los pasos son independientes por lo que el error no es acumulativo.

2.4.2 Fuente láser.

La tecnología láser a entrado muy fuerte en los últimos años como herramienta de trabajo en la parte industrial, permitiendo realizar diferentes trabajos como, cortes precisos y grabados en la superficie del material. Con el control adecuado el láser ayuda a mejorar la calidad y el tiempo de producción.

Un láser se podría decir que está conformado básicamente por un Medio Activo siendo la parte principal, una Fuente de Excitación o Sistema de Bombeo y la cavidad por donde va a salir el haz de luz.

Al láser se le puede definir como una fuente de luz, siendo un dispositivo que produce y amplifica un haz de radiación electromagnética; la longitud de onda que produce el láser a través del haz de luz se encuentra entre los 200 nanómetros a 1 milímetro, siempre y cuando se tenga un control adecuado de todo el dispositivo. [21].

2.4.2.1 Clasificación.

A los dispositivos láser se puede clasificar por diferentes aspectos ya que están contruidos con una gran variedad de tecnología que son muy importantes para la generación del haz del láser. Por ejemplo se les puede clasificar según el medio activo, la longitud de onda, la potencia de salida, la forma de excitación entre otras más.

A continuación se va explicar los más comunes en el medio comercial.

- Medio Activo.

El medio activo es la fuente para la generación del haz del láser este puede tener los tres estados de la materia:

Gaseoso. El medio activo gaseoso es el más utilizado para las diferentes aplicaciones que tienen los láseres, la potencia que genere el láser va depender directamente del gas que se ocupe por ejemplo.

La combinación de Helio-Neón (He-Ne) genera un rayo de color rojo puro pero su potencia está catalogado como baja, mientras que el Dióxido de Carbono (CO₂) emite un haz infrarrojo que no puede ver el ser humano, pero la potencia que genera esta cataloga como variable [22], es decir se puede obtener una baja potencia, mediana potencia y alta potencia, este tipo de láser es utilizado comúnmente para aplicaciones de soldado, corte y grabado de materiales.

Líquido. El medio activo líquido es mediante colorantes orgánicos disueltos en solubles apropiados, para tener una idea más clara se puede comparar con las anilinas para teñir, el haz emitido es muy eficiente y pueden ser continuos o pulsantes [22]. Este tipo de medio activo puede generar una gran gama de longitud de onda, esta puede ir desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, pero el único inconveniente para recorrer este espectro es que se debe ir cambiando el colorante.

Sólido. Con el medio activo sólido no se ha podido obtener gran información, pero se puede decir que el material más común que se encuentra son los materiales cristalinos o de vidrio con compuestos que pueden emitir luz.

- Excitación.

Si se desea clasificar según la excitación se puede dividir básicamente en tres grupos.

Excitación Óptica. Al tener una excitación óptica el estado de la materia del medio activo por lo general debe de ser líquidos y uno que otro sólido, la fuente de excitación óptica debe presentar como característica principal una muy alta potencia como la que genera una lámpara de flash o el mismo láser. Si la fuente de excitación no es lo suficientemente potente para poder excitar al medio activo simplemente no se podrá generar el haz del láser.

Excitación por descarga Eléctrica. Mientras que si la excitación es por descarga eléctrica el estado de la materia del medio activo debe de ser gases o sólidos específicos denominados láseres de semiconductores; la fuente de excitación por descarga eléctrica está basada en el mecanismo de las lámparas fluorescentes, por lo que se tiene de igual forma una tubo cerrado que contiene al gas que sufrirá la descarga eléctrica para generar la corriente necesaria para producir el haz del láser.

Excitación Química. La excitación por procesos químicos no es muy recomendada por lo que no se ha podido encontrar información.

2.4.2.2 Características.

Los láseres pueden generar un haz continuo o entrecortado, lo cual va a depender directamente del control de la excitación al medio activo. El láser que genera un haz continuo es silencioso mientras que los láseres que generan el haz en forma pulsante provocan un ruido en forma de disparo. Las fuentes láser deben cumplir con tres parámetros importantes como son:

Las fuentes láser deben cumplir con tres parámetros importantes como son:

- **Monocromático:** Al referirse a monocromático quiere decir, la emisión de colores muy bien definidos y puros en el rayo del láser; como se mencionó

anteriormente el color del rayo va a depender del medio activo que se esté utilizando. Este parámetro es lo que le diferencia al láser del resto de fuentes comunes, es decir el láser entrega una longitud de onda específica dando como resultado un solo color o entrando al espectro infrarrojo o ultravioleta, siendo estas dos últimas no visibles para el ser humano, mientras que las fuentes de luz convencionales emiten una mezcla de colores como un arcoíris.

- **Coherente:** Es decir que todas las ondas electromagnéticas producidas al momento de generar el haz del láser coinciden o están en fase, es por eso que se produce un solo color o una longitud de onda específica más la característica de direccionalidad.
- **Direccionalidad:** Uno de las características más importantes es la direccionalidad al momento de su aplicación, puesto que el haz del láser que es emitido no se extiende o se abre en pequeñas distancias como es el haz de una lámpara convencional, el láser siempre mantiene su rayo como una línea recta muy fina. Como dato importante el diámetro del haz del láser convencional llega a medir 1 metro de diámetro a una distancia de 1 kilómetro.

La longitud de onda es directamente proporcional del medio activo que se está aplicando, así se puede generar diferentes longitudes de onda por lo que se puede tener un haz dentro de la parte del espectro visible, infrarrojo o ultravioleta. Si el medio activo que se está utilizando genera un haz dentro del espectro visible, la longitud de onda se encuentra dentro del rango de los 400 a 700 nanómetros, y en los espectros invisibles o no visibles para el ser humano se tiene el espectro ultravioleta entre los 200 a 400 nanómetros y el espectro infrarrojo que va desde 700 a 106 nanómetros.

Duración. Al referirse a la duración quiere decir el tiempo de duración de emisión del haz del láser, como ya se ha venido mencionando el láser puede funcionar en forma continua o en forma pulsante.

Si la emisión del haz de de forma continua la variable t se considera mayor a los 0.25 segundos, mientras si la emisión es de forma pulsante t debe de ser menos a los 0.25 segundos.

Potencia. La potencia de salida del haz del láser es una de las características que sufre grandes variaciones, se puede decir que la potencia está en función de la duración del haz, si es un láser continuo se puede decir que tiene una potencia

máxima de salida (media en watios), mientras que los láser que son de forma pulsante se caracteriza por su energía total por pulso (media por julios) para ello se debe tener presente la potencia pico, la duración del pulso y la frecuencia de repetición del pulso.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL SISTEMA

Antes de empezar con el análisis cinemático del sistema articulado se debe tener un conocimiento de cómo está constituido un manipulador, ya que el análisis está basado en cómo está construido físicamente

3.1 Fundamentos mecánicos.

Como dato adicional se debe tener presente que, el diseño y construcción de la parte mecánica de la cortadora CNC láser, fue realizado por mecánicos de la empresa CADITEX, los cuales fueron los encargados de realizar el estudio mecánico de la CNC láser que se está implementado.

El análisis cinemático está basado en el estudio de movimientos, generando trayectorias como rectas, parábolas, y circunferencias más una serie de posibles combinaciones que se puedan dar entre sí, las cuales son realizadas por diferentes cuerpos que conforman una máquina “manipulador”. Se debe tener presente que, una máquina está conformada por el arreglo de cuerpos resistentes, los cuales van a transmitir la fuerza y movimiento mecánico para realizar el trabajo deseado.

3.1.1 Estructura mecánica de robots.

Cuando se realiza un análisis cinemático, los cuerpos resistentes toman el nombre genérico de eslabones. Para conectar un eslabón con otro o simplemente con la base o el actuador de la máquina, es necesario de una articulación móvil o par, logrando así comunicarse los eslabones y transmitir la fuerza y movimiento que se está generando.



Figura 3.1: Tipos de Articulaciones [4].

Al utilizar una articulación según el diseño de la máquina se puede obtener uno, dos, tres hasta cinco grados de libertad dependiendo del par que se esté utilizando [4]. Al grado de libertad se le denomina al movimiento que brinda cada par con respecto al eslabón donde está colocada la articulación con el eslabón anterior [23].

Para identificar el número total de Grados De Libertad “GDL” de un máquina, se debe ver el tipo de articulación que se está utilizando en cada unión, como ya se indicó, estas pueden ser unión base–eslabón, eslabón–eslabón y eslabón–actuador, una vez identificados los tipos de articulaciones implementadas, se suman los grados de libertad que brinda cada uno de ellos para obtener el número total de grados de libertad, se puede decir que los grados de libertad están en función del tipo de articulación.

La combinación de los elementos como son una base, una articulación, un eslabón y un actuador da como resultado una cadena cinemática, donde la cinemática es la encargada de definir, controlar e implementar el movimiento sobre los cuerpos que conforman la cadena.

Se debe tener muy en cuenta el tipo de articulación, estos pueden realizar dos tipos de movimientos, desplazamiento y giro, la combinación de los dos movimientos da como resultado la existencia de seis tipos de articulaciones [4], siendo los más comunes los que se muestran en la *figura 3.1*.

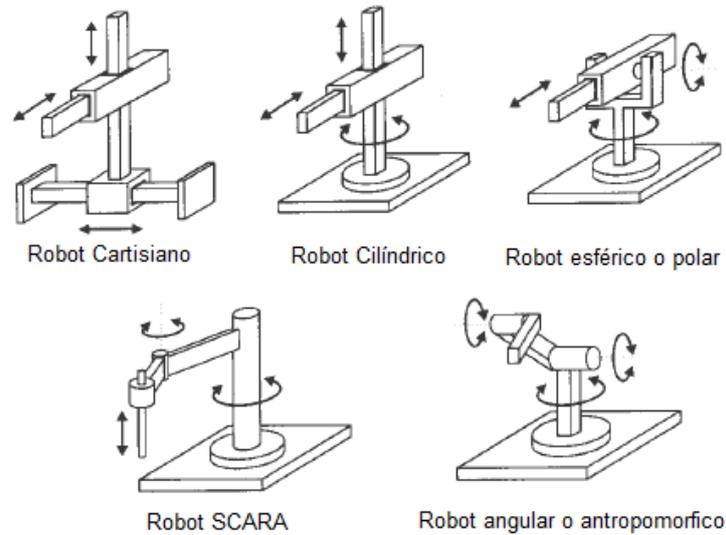


Figura 3.2: Configuración más frecuente de robots industriales [4].

Con los diferentes tipos de articulaciones indicados en la *figura 3.1* se puede llegar a obtener robots industriales tan complejos como sean posibles o tan simples como sea necesario, todo depende de la cantidad de grados de libertad que se desea que tenga el manipulador, en la *figura 3.2* se puede ver unos ejemplos típicos de robots que se manejan en la industria.

A la máquina cortadora CNC láser se le puede comparar con el robot cartesiano por los movimientos que realizan ambos manipuladores. Como se puede ver en la *figura 3.2* el robot cartesiano realiza los movimientos de desplazamiento en los tres ejes XYZ, mientras que la máquina cortadora realiza el movimiento de desplazamiento solo en los ejes XY, al eje Z se lo puede remplazar por el control de la potencia del haz del láser.

3.1.2 Transmisión y reductores.

Una vez que se tiene visto los tipos de eslabones y articulaciones que se van a utilizar, es importante saber el tipo de transmisión o reductor que se va emplear para transmitir los movimientos de los actuadores.

Al hablar de transmisiones se tiene dos puntos importantes por tratar que son, como disminuir al máximo los momentos de inercia y los pares estáticos que deben vencer los actuadores [4], para ello se recomienda que los actuadores se coloquen lo más cerca posible de la base de la máquina o robot y aplicar un sistema de

Tabla 3.1: Sistemas de transmisión [4].

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancias grandes	-
	Cadena	Distancias grandes	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
Circular-Lineal	Cable	-	Deformabilidad
	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal-Circular	Paral articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

transmisión para realizar los movimientos necesario, en la *tabla* 3.1 se puede ver los sistemas de trasmisión más utilizados en la parte de la industria.

Es importante ver que el sistema de transmisión cumplan con diferentes parámetros como son, funcionamiento continuo, pares elevados, y que soporte grandes distancias de acoplamiento [4]. Los sistemas de transmisión también influyen en la parte del análisis cinemático, una de sus características es que estos pueden cambiar el tipo de movimiento como es el caso de circular a lineal y viceversa, en cuanto a los reductores es lo contrario que las transmisiones.

En otros casos se evita la conexión de transmisores y reductores por lo que no se puede evitar rozamientos y juego angular evitando que se logre el máximo valor de precisión y velocidad deseado. Para ello se tiene el accionamiento directo el cual garantiza ventajas como son [4]:

- Un posicionamiento rápido y preciso.
- Se tiene un mayor porcentaje de control del sistema a cambio de mayor complejidad.
- Se simplifica el sistema mecánico.

3.1.3 Actuadores y sensores.

En cuanto a los actuadores se tiene una gran variedad ya que estos pueden ser neumáticos, hidráulicos y eléctricos; dependiendo de la aplicación se escogerá el más conveniente, para el caso de la máquina cortadora láser, se encuentra en el campo de actuadores eléctricos con motores paso a paso los cuales ya se explicó en el *capítulo* 2.

Los sensores son muy importantes para el correcto funcionamiento de un robot, estos indican la posición y orientación del manipulador, los sensores se puede dividir por la información que van a brindar. Sensores internos los cuales indican principalmente la posición de sus articulaciones mientras que los sensores externos indican el estado de su entorno.

Para la máquina CNC láser como ya se explicó de en el *capítulo 2* se tiene dos sensores, los cuales indican el punto de inicio (home), perteneciendo un sensor al eje X y el otro sensor al eje Y, así cada vez que se va empezar un nuevo diseño el manipulador busca el punto inicial para posicionarse y efectuar los cortes.

3.1.4 Elemento final..

Los terminales también conocidos como efectores finales son los encargados de interactuar directamente con el entrono del robot [4], estos terminales se los puede clasificar como terminales de sujeción o herramienta, como ya es de imaginarse el terminal para la CNC láser se encuentra clasificada como herramienta.

Una vez que se tiene armado todo el sistema mecánico se puede empezar a realizar el análisis cinemático de la máquina láser, para ello se divide en análisis cinemático directo y análisis cinemático inverso los cuales se ven en las *secciones 3.2.1 y 3.2.2* del presente capítulo.

3.2 Cinemática.

La cinemática básicamente se centra en el análisis para determinar la posición y orientación final del actuador del robot o máquina sin considerar las fuerzas que intervienen en él, para ello se debe establecer un sistema de coordenadas de referencia fija, en el cual va estar sometido todo el sistema del manipulador para el análisis, tratando de explicar cómo se va a mover el robot en el espacio como función del tiempo y lo más importante indicar una relación entre la posición y la orientación del extremo donde va estar colocado el terminal [23].

La cinemática se puede dividir en dos métodos de resolución como son el análisis cinemático directo y el análisis cinemático inverso, para su resolución se tiene los métodos de análisis de Denavit y Hartenberg el cual se basa en una matriz de

transformación homogénea (T) de 4×4 *ecuación 3.1*, donde se representa la geometría espacial de la cadena cinemática, siempre y cuando se haga con respecto a un sistema de referencia fija.

La matriz de transformación homogénea está compuesta por cuatro sub-matrices como se puede ver a continuación, para mayor información se puede revisar fundamentos de la robótica [4]:

- Sub-matriz de Rotación $R_{3 \times 3}$.
- Sub-matriz de Traslación $P_{3 \times 1}$.
- Sub-matriz de Perspectiva $f_{1 \times 3}$.
- Sub-matriz de Escalado Global $w_{1 \times 1}$.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Cuando se realiza un análisis cinemático en robótica se debe tener en cuenta que a la sub-matriz de perspectiva se le considera como nula mientras que la sub-matriz de estado global como uno.

Con este método se puede describir la relación espacial que existe entre los eslabones adyacentes y determinar la posición espacial del actuador con respecto al sistema de referencia fija. El análisis cinemático también trata de ver la relación que se tiene entre las velocidades de cada una de las articulaciones y del actuador que sería el punto que se desea controlar, este se obtiene mediante la matriz Jacobiana o modelo diferencial [4].

Para robots donde se tiene movimientos dependientes de un eslabón con respecto a otro los métodos de Denavit y Hartenberg más la matriz Jacobiana son ideales ya que permiten mostrar la relación espacial del actuador con respecto al sistema de coordenadas fijas, pero en el caso del robot cartesiano o específicamente de la CNC láser, los movimientos son independientes entre el eje X y el eje Y, dando como resultado un cálculo más sencillo y directo.

3.2.1 Análisis cinemático directo.

El análisis cinemático directo consiste en determinar la posición y orientación del terminal (extremo final) del robot, partiendo desde el conocimiento de los valores angulares de cada una de las articulaciones y los parámetros geométricos que conforman al robot, todo esto bajo un sistema de coordenadas de referencia fija [23].

Es decir, que para posicionar y orientar al extremo final del robot se debe ingresar al sistema de control una serie de ángulos, entre las articulaciones y el sistema de coordenadas de referencia fija del robot, por lo que es necesario tener conocimiento de los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos.

Se debe recordar que los valores de las articulaciones son leídos constantemente por el sistema de control para poder tener un control del movimiento de sus extremidades.

3.2.2 Análisis cinemático inverso.

Como su nombre lo indica “cinemática inversa”, es el proceso inverso de la cinemática directa, ya que consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para poder posicionar y orientar al extremo del robot según una determinada coordenada espacial que se le dé al sistema de control [4].

En el análisis cinemático inverso sus ecuaciones dependen de la configuración del robot, esto quiere decir en cómo está construido mecánicamente y que movimientos puede realizar, mientras que en el análisis cinemático directo no es inconveniente ya que tiene la ayuda de la matriz de transformación homogénea, la cinemática inversa al depender de la configuración del robot, es muy frecuente que la solución no sea única, complicando la solución del problema.

Al complicarse el método de análisis cinemático inverso se han desarrollado diferentes procedimientos genéricos programables en un computador (métodos numéricos iterativos, teniendo la desventaja de no garantizar la convergencia de la solución), siempre y cuando sean con conocimiento de cinemática. Al resolver el análisis cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada, esto es, encontrar una expresión de la forma como se ve en la ecuación 3.2 [4]:

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (3.2)$$

$$k = 1 \dots n(\text{GDL})$$

Donde:

- $q_{1 \dots n} = \text{Variables de articulaciones.}$
- $x, y, z = \text{Coordenadas de posición.}$
- $\alpha, \beta, \gamma = \text{Coordenadas de orientación.}$

Es decir, en el análisis cinemático inverso se parte desde las coordenadas a las que se desea llegar con el extremo del robot, estas coordenadas son ingresadas en el sistema de control donde se efectuará todos los cálculos mediante los métodos genéricos que se vea más conveniente.

3.3 Cálculos.

Como se indicó en la sección anterior, los cálculos para un robot cartesiano se simplifican totalmente por su configuración mecánica, por lo que no hace falta utilizar la matriz de transformación homogénea.

3.3.1 Cálculo del análisis cinemática directa.

Datos:

Diámetro del eje y banda acoplada al motor.	(d)	22.2 mm.
Resolución del motor.	(r _{motor})	1.8°
Número de paso por revolución.	#pasos/rev	200 pasos
Factor micro paso.	(f _{paso})	10

Tabla 3.2: Datos Para calculo de la Cinemática

Como se puede ver el diámetro (d) con el que se trabaja está dado por el engrane o piñón, el cual está acoplado directamente al eje del motor y la banda que va a dar

el movimiento lineal. La resolución del motor (*rmotor*) y el factor de micro paso (*fupaso*) son datos directos del catalogo del motor y el driver que están implementados en la CNC láser, los motores y drivers que se implementaron para la generación de los movimientos en los ejes XY son de características similares, por lo que los datos para los cálculos de la cinemática directa e inversa son los mismos.

Resolución angular (*rangular*).

$$rangular = \text{resolución de trabajo}$$

$$rangular = \frac{rmotor}{fupaso}$$

$$rangular = \frac{1.8^\circ}{10}$$

$$rangular = 0.18^\circ$$

Perímetro (*p*).

$$P = d\Pi$$

$$P = 22.2\Pi$$

$$P = 69.7434\text{mm}/\text{rev}$$

Resolución lineal (*rlineal*).

$$rlineal = \frac{(rangular * p)}{(360^\circ)}$$

$$rlineal = \frac{0.18^\circ * 69.7434}{(360^\circ)}$$

$$rlineal = 0.0116\text{mm}/\text{paso}$$

$$posicion = rlineal * \#pasos$$

$$\#pasos = \frac{(posicion)}{(rlineal^\circ)} \quad (3.3)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones del análisis cinemático directo se le puede controlar el movimiento del manipulador ingresando las coordenadas a las que se desea que se desplace la herramienta, siempre y cuando estén dentro del área de trabajo (480mm x 500mm) caso contrario el sistema de control no lo permitirá realizar el movimiento.

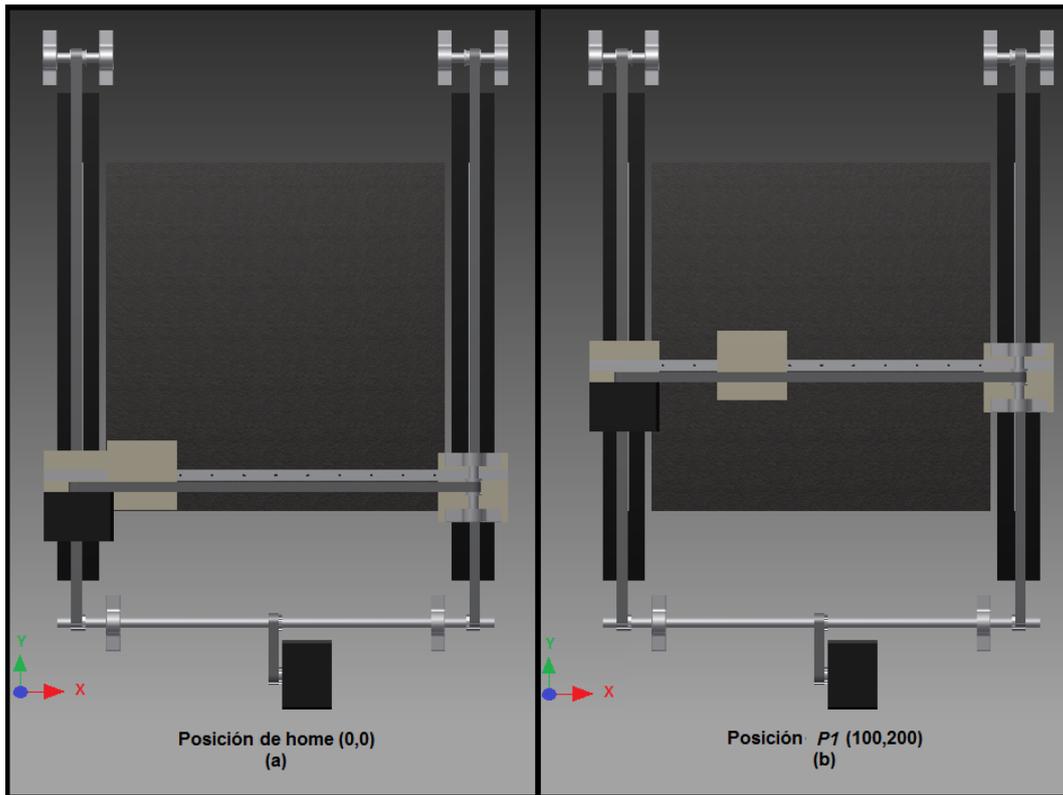


Figura 3.3: Desplazamiento con cinemática directa del punto (0,0) al punto (100,200).

Como se puede ver en la *figura 3.3* (a) la herramienta se encuentra en home lo que indica que esta en la coordenada (0,0), si se desea desplazar la herramienta a una coordenada P1 que este dentro del área de trabajo como por ejemplo al punto (100,200), se aplica la *ecuación 3.3* tanto para el desplazamiento en el eje X como para el eje Y, donde se tiene como constante la resolución lineal y la variable de posición que es a donde se desea desplazar, reemplazando los datos se obtiene el número de pasos que debe efectuar cada motor para llegar al punto especificado como se puede ver en la *figura 3.3* (b).

3.3.2 Cálculo Análisis Cinemático Inverso.

Factor de escala (fescala).

$$fescala = \frac{1}{rlineal}$$

$$fescala = 86.0297$$

$$\#pasos = posicion * fescala$$

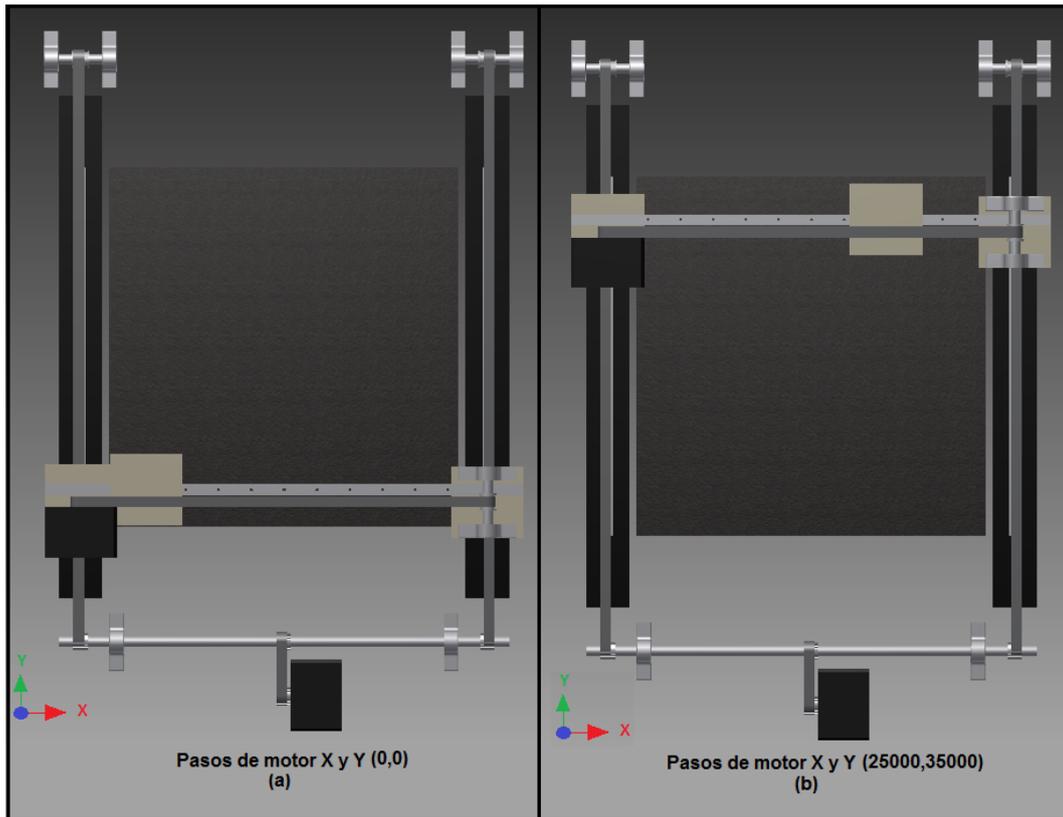


Figura 3.4: Desplazamiento con cinemática inversa de (0,0) pasos, a (25000,35000) pasos.

$$posicion = \frac{(\#pasos)}{(fescala^\circ)} \quad (3.4)$$

De igual manera que en la cinemática directa se ha obtenido una ecuación correspondiente para la cinemática inversa, donde se tiene una constante que es el factor de escala y la variable de número de pasos que se desea realizar, reemplazando los datos indicados se obtiene la posición al que se va a desplazar la herramienta.

Al tener la herramienta en la posición de home como se puede ver en la *figura 3.4 (a)*, quiere decir que los motores no han realizado ningún paso, aplicando la *ecuación 3.4* como *fescla* es constante se ingresa el número de pasos que se desea realizar, por ejemplo para que el motor del eje X ejecute 25000 pasos y el motor del eje Y realice 40000 pasos se obtendrá un desplazamiento *x* como se puede ver en la *figura 3.4 (b)*.

CAPÍTULO 4

ARQUITECTURA LÓGICA DEL SISTEMA

La arquitectura lógica de una máquina de corte láser consta de cada uno de los subsistemas digitales embebidos en el sistema de Control Numérico por Computador.

Dichos subsistemas son divididos por su estructura lógica en dos grupos principales:

- Algoritmos de Control.
- Protocolos de Comunicación.

4.1 Algoritmos de control

Como su nombre lo indica, los algoritmos de control tienen la tarea de controlar el correcto funcionamiento de cada uno de los procesos en los cuales se encuentran implementados. Para ello es necesario delimitar su funcionamiento a tareas bien definidas conjuntamente con un flujo de datos ordenado (ver en la *figura 4.1*).

Los bloques de control están implementados en espacios divididos de acuerdo a las condiciones de velocidad, predictibilidad y robustez que el sistema requiere para su correcto funcionamiento, teniendo así tres espacios fundamentales:

1. **Espacio de Usuario:** Es el espacio donde Linux desarrolla su funcionamiento común como S.O sin opciones mayores de priorización o programación de tareas específicas [24].

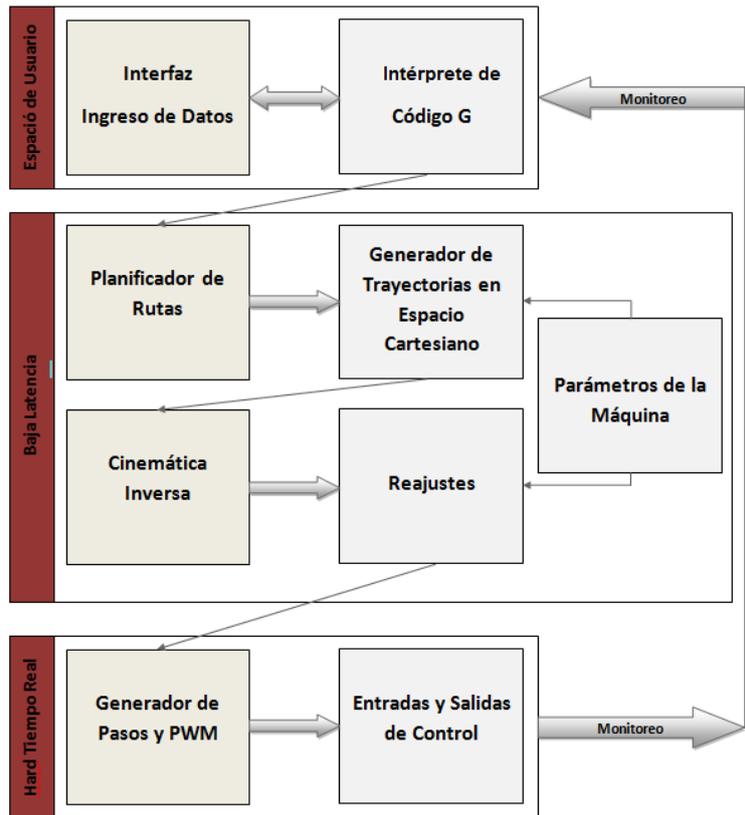


Figura 4.1: Diagrama de Bloques del Sistema de Control.

2. **Espacio de Baja Latencia:** Comúnmente conocido como Soft Tiempo Real. Aquí se desarrollan tareas en tiempo real cumpliendo, en general un tiempo promedio en cada iteración y con la facilidad de manipular el programador de tareas y la asignación de prioridad [25].
3. **Espacio de Hard Tiempo Real:** En este espacio se realiza la ejecución de tareas que deben cumplir rigurosamente condiciones de predictibilidad y velocidad establecidas por el sistema, sin que exista desviación alguna a lo largo del tiempo de dichos parámetros [26].

A continuación se explica cada uno de los bloques establecidos en el sistema de control.

4.1.1 Interfaz e ingreso de datos.

Permite la comunicación e interacción amigable del sistema con el usuario y el ingreso de la información necesaria al momento de realizar la configuración del sistema.

Normalmente la información es visualizada mediante un monitor y la interacción se la realiza por medio del teclado y el ratón del computador. Es posible también la interacción mediante la inclusión de dispositivos de pantalla táctil (touch screen) al monitor siendo compatibles con el S.O. o mediante acceso remoto al PC utilizando el protocolo TCP/IP.

Tanto en el desarrollo del sistema de corte láser como en el sistema terminado es necesario un proceso de mantenimiento y corrección de errores para su correcto funcionamiento, por lo que se requiere un constante monitoreo de las señales enviadas y recibidas a la máquina, con este fin el controlador de interfaz cuenta con un sistema de visualización de las variables más importantes y se desean monitorear.

Parte de las funciones de la interfaz gráfica es dar la posibilidad de “abrir” el archivo .ngc de código G y enviarlo al intérprete para luego recibir los datos del mismo decodificados para ser presentados de forma gráfica en pantalla.

4.1.2 Intérprete de código G

El estándar a nivel mundial en maquinaria CNC es el código G (código General), por ello se implementa el intérprete NIST RS274NGC [5], el cual es capaz de leer e interpretar el lenguaje RS274/NGC en donde se encuentra detallada toda la información geométrica, velocidades de avance y potencia de corte del laser.

Su funcionamiento consta de dos etapas primordiales:

- La primera etapa lee las funciones a interpretar conjuntamente con información adicional acerca de limitantes impuestas para los trazos, los cuales son definidos en un archivo de extensión .ngc que es parte del standard del lenguaje.
- La segunda etapa entrega al siguiente bloque de control las funciones canónicas de la máquina conjuntamente con información adicional que puede ser mostrada en pantalla, siendo éste el lenguaje entendido por los bloques de control posteriores; las dos etapas son mostradas en la *figura 4.2*.

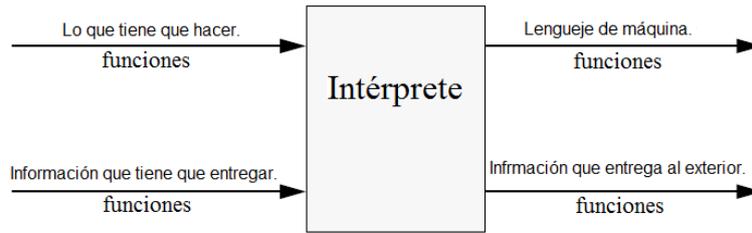


Figura 4.2: Diagrama de Bloques del Intérprete [5].

4.1.3 Planificador de rutas

La resolución de la problemática en planeación de rutas es estudiada en todo tipo de robots. Esta tarea consiste en buscar la ruta óptima en el espacio cartesiano como también en el espacio articular para que el robot interactúe de manera correcta con su entorno y consigo mismo para que sus articulaciones no interfieran con su propio movimiento.

El problema de planeación de trayectorias es ampliamente estudiado por Kuffner [27] para el caso de robots articulados. Otro estudio interesante realizado por LaValle [28], enfocando primordialmente el posicionamiento de la herramienta para la ejecución de la tarea designada al manipulador.

La planeación de rutas es ampliamente usada en robots móviles de ruedas, tal como lo muestra Bohlin y Kavraki [6]. En su trabajo presentan un algoritmo de implementación simple el cual se puede ver en la *figura 4.3* capaz de determinar en tiempo real la ruta más óptima a seguir, siendo ésta la más corta y a su vez interactuando con su entorno en búsqueda de nuevas posibles colisiones del robot.

Como se puede apreciar en todos los casos presentados anteriormente la planeación de rutas se encuentra estrechamente ligada a tres aspectos:

- La geometría del robot.
- La cinemática del robot.
- El ambiente de trabajo.

Tomando el caso del robot cartesiano, más concretamente de la CNC de corte láser se puede observar una independencia total en cada eje de movimiento, lo cual limita la planeación de rutas a la geometría del robot y al ambiente de trabajo.

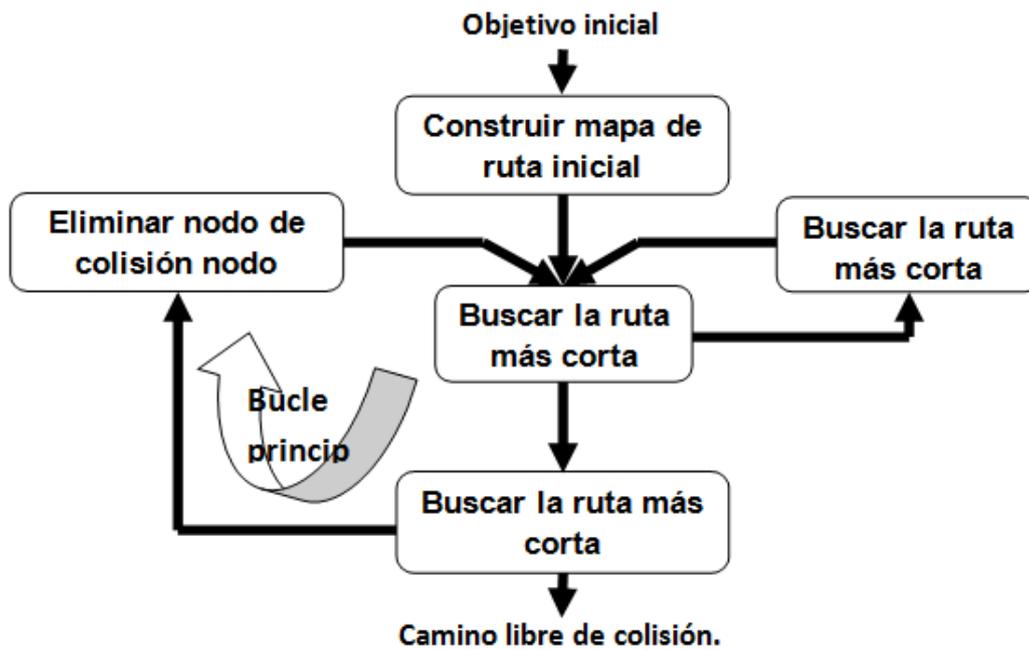
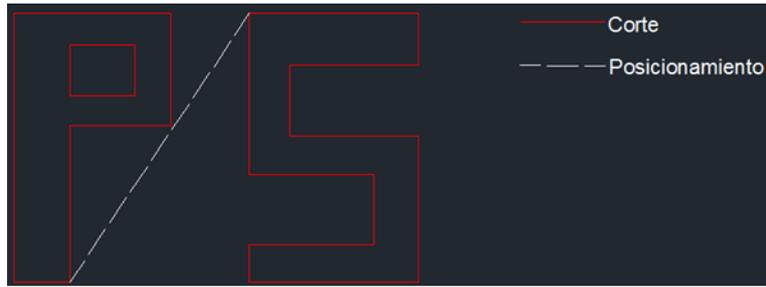


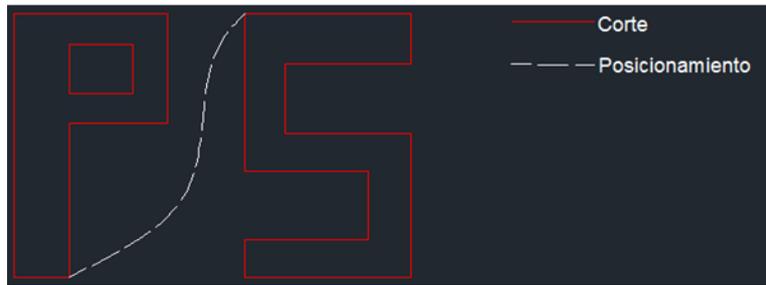
Figura 4.3: Algoritmo de Planeación de Rutas [6].

Geometría del Robot: Hace referencia a las limitantes constructivas para el movimiento. Estas a su vez determinan el área de trabajo del robot. Con este fin para la localización espacial del robot se tienen colocados dos sensores fin carrera, uno para el eje de movimiento "X" y otro para el eje de movimiento "Y". De acuerdo a estos sensores el robot podrá localizar el punto 0,0 del tablero XY cada vez que el sistema empiece su funcionamiento. El punto 0,0 del tablero es límite mínimo de posición. No se dispone de sensores de retroalimentación constante de la posición o velocidad del robot por lo que el límite máximo estará determinado por el número de pasos dados y la relación mecánica que estos tienen con el avance del láser.

Ambiente de Trabajo: Verifica las limitantes existentes dentro del área de trabajo, estas pueden ser obstáculos que limiten el paso por determinadas zonas. Dado que robot no dispone de sensores externos como cámaras o sensores de proximidad no es posible la evaluación de la presencia de objetos en el área de trabajo por lo que se considera un área interna sin limitantes. Esto genera libertad de movimiento lo cual es aprovechado para desplazamientos sin limitación de velocidad. Esto es posible realizando el desplazamiento en espacio articular punto a punto sin considerar la trayectoria en el espacio cartesiano. La utilidad de este tipo de desplazamiento se ve presente al momento de desplazarse el láser de un lugar a otro sin realizar acción de corte alguna ver la *figura 4.4*.



a: Posicionamiento con seguimiento de trayectoria.



b: Posicionamiento sin trayectoria a velocidad máxima.

Figura 4.4: Ejemplos de posicionamiento.

4.1.4 Generador de trayectorias en el espacio cartesiano

La búsqueda de rutas óptimas requiere un análisis espacial para la determinación del desplazamiento del robot. La generación de trayectorias busca una relación entre dos dominios diferentes: el espacial y el temporal [7]. Estando el dominio espacial totalmente definido con la planeación de rutas y siendo este coincidente con el espacio cartesiano, queda por definir la ley de movimiento que determine el desplazamiento. Esto provoca que comúnmente quede expresado el desplazamiento como una función parametrizada del tiempo.

Existen dos categorías de trayectorias según la característica del espacio para su movimiento ver la *figura 4.5*.

La diferencia entre la generación de trayectorias unidimensionales y multidimensionales viene determinada por el número de GDL que deben cumplir la trayectoria. Siendo el primer tipo una función escalar del tiempo y el segundo tipo una función vectorial las cuales son expresadas en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$q = q(t) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(t) \quad (4.2)$$

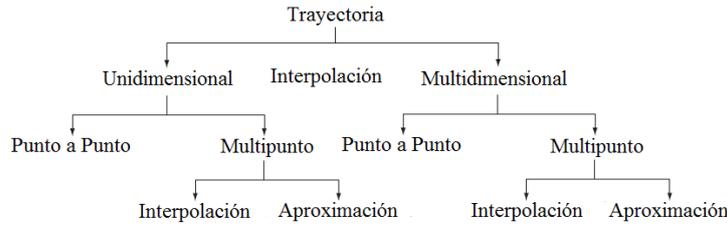


Figura 4.5: Categorías en la planeación de Trayectorias [7].

Para la comprensión de los conceptos de generación de trayectoria multidimensional es necesario iniciar con el estudio del caso unidimensional, para posteriormente generalizarlo al caso de varias dimensiones.

4.1.4.1 Trayectoria lineal

Es caracterizada por un comportamiento de la trayectoria de posición con respecto al tiempo, también es conocida como trayectoria con velocidad constante para tener una mejor idea se puede ver en la *figura 4.6*.

Su posición en función del tiempo viene determinada por la ecuación 4.3 [7]

$$q(t) = a_0 + a_1(t - t_0) \quad (4.3)$$

$$a_0 = q(t_0)$$

$$a_1 = \frac{q(t_1) - q(t_0)}{t_1 - t_0}$$

donde: t_0 =tiempo inicial, t_1 =tiempo final, $q(t_0)$ =posición inicial y, $q(t_1)$ =posición final.

La velocidad está determinada por la razón de cambio de la posición en función del tiempo como muestra la ecuación 4.4

$$\dot{q}(t) = \frac{q(t_1) - q(t_0)}{t_1 - t_0} \quad (4.4)$$

La velocidad es constante en toda la trayectoria, siendo así la aceleración igual a cero en cualquier punto.

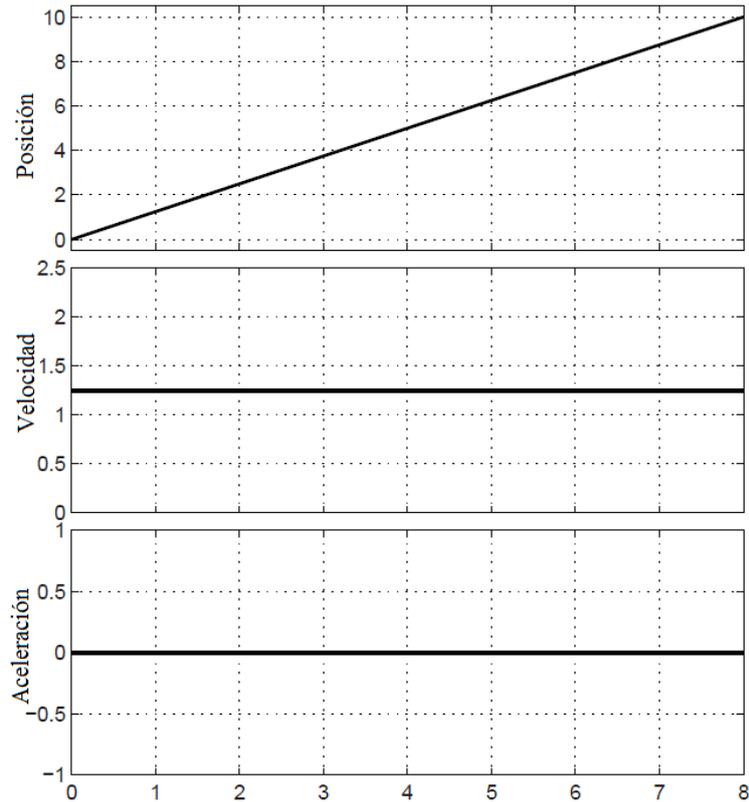


Figura 4.6: Posición velocidad y aceleración de una trayectoria lineal, ($t_0 = 0, t_1 = 8, q_0 = 0, q_1 = 10$) [7].

Al existir matemáticamente la posibilidad de realizar cambios instantáneos de velocidad en los puntos inicial y final de la trayectoria, presenta grandes inconvenientes en la implementación real. Esto se debe a la necesidad de disponer de aceleración infinita en dichos instantes lo cual no es posible. Este efecto genera un sobre esfuerzo en los actuadores disminuyendo drásticamente su tiempo de vida útil y la vibración mecánica de todo el sistema.

4.1.4.2 Trayectoria trapezoidal

Habiendo conocido la problemática de iniciar el movimiento con cambios bruscos de velocidad es necesario realizar un control sobre ella. Esto se consigue con la delimitación de zonas de aceleración y desaceleración en el perfil de velocidad como muestra en la *figura 4.7*

Al tratarse de un perfil compuesto por tres zonas fácilmente identificables (aceleración, velocidad constante, desaceleración), es necesario realizar un análisis independiente en cada una de ellas pero conservando la continuidad en el movimiento.

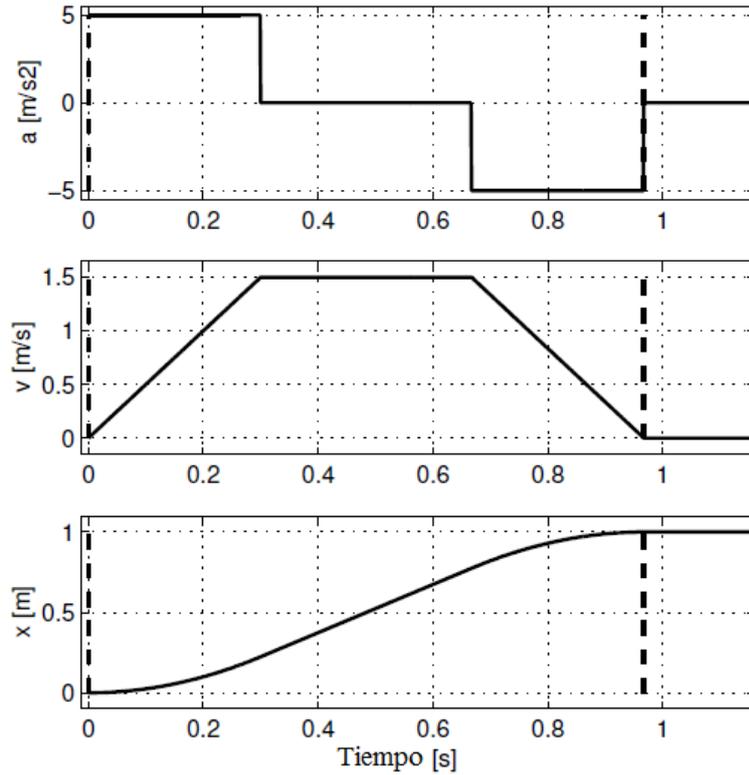


Figura 4.7: Aceleración, velocidad y posición en un perfil de velocidad trapezoidal [7].

Si se considera T_a como el intervalo de tiempo de aceleración, t_0 y t_1 como el tiempo inicial y final respectivamente de desaceleración y v_m como la velocidad que se desea alcanzar en el intervalo de velocidad constante, mediante deducción se obtiene la ecuación de la recta (ver la ecuación 4.5) expresa la velocidad en cada intervalo.

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \frac{v_m}{T_a}(t - t_0), & t_0 \leq t < t_0 + T_a \\ v_m, & t_0 + T_a \leq t < t_1 - T_a \\ \frac{v_m}{T_a}(t_1 - t), & t_1 - T_a \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

Por integración a la ec. 4.5 es posible obtener la función de posición en función del tiempo obteniendo las constantes con las condiciones iniciales presentes en cada intervalo de integración, el resultado de este proceso se muestra en la ecuación 4.5:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \frac{v_m}{2T_a}(t - t_0)^2, & t_0 \leq t < t_0 + T_a \\ q_0 + v_m \left(t - t_0 - \frac{T_a}{2}\right), & t_0 + T_a \leq t < t_1 - T_a \\ q_1 - \frac{v_m}{2T_a}(t_1 - t)^2, & t_1 - T_a \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Derivando la ec. 4.5 se obtiene la aceleración en cada intervalo como muestra la ecuación 4.7:

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} \frac{v_m}{T_a}, & t_0 \leq t < t_0 + T_a \\ 0 & t_0 + T_a \leq t < t_1 - T_a \\ -\frac{v_m}{T_a}, & t_1 - T_a \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4.7)$$

Como resultados de la utilización del perfil de velocidad trapezoidal se obtiene el control total de la velocidad, evitando cambios bruscos en la misma. Las aceleraciones máximas y mínimas se ven limitadas a los rangos que los actuadores puedan soportar.

A pesar de tener control sobre la velocidad, no es posible la obtención de un perfil de aceleración mas suavizada. Esto produce vibraciones a causa de los momentos de inercia propios de la máquina a causa de cambios bruscos en la aceleración de los actuadores.

4.1.4.3 Trayectoria double-S

Para obtener un perfil de aceleración continuo sin cambios bruscos es posible aplicar un concepto similar al aplicado en la trayectoria trapezoidal. Como muestra la sección 4.1.4.2, si se suaviza el perfil de posición en sus extremos se obtiene una continuidad en el perfil de velocidad. Aplicando un concepto similar, si se suaviza el perfil de velocidad en sus extremos es posible obtener un perfil de aceleración continuo tal como se muestra en la *figura* 4.8. Este perfil es denominado Double-S por su forma inicial y final en la velocidad.

Es posible obtener un concepto nuevo denominado Jerk o sacudida. Este nuevo parámetro es la medida de la razón de cambio de la aceleración con respecto al tiempo. Es comúnmente usado en el diseño de máquinas como se muestra en [29]

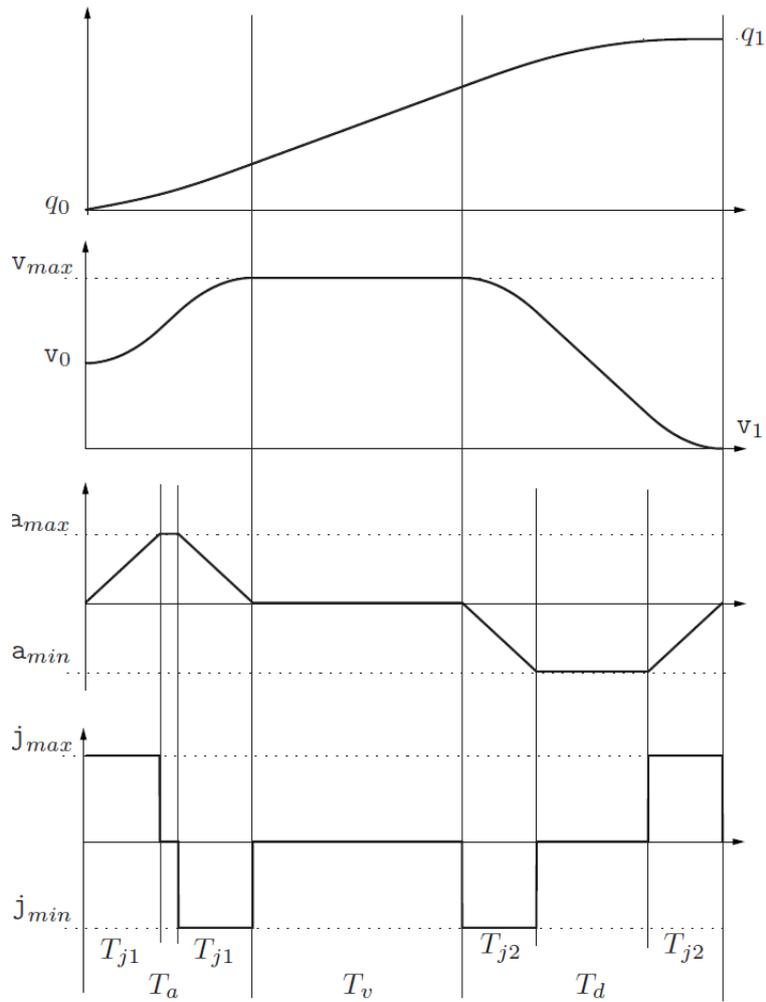


Figura 4.8: Trayectoria Double-S: Posición, Velocidad, Aceleración y Jerk [7].

y [30], para el análisis del tiempo de vida de los sistemas, ya que una máquina sometida a jerk elevados tiene un tiempo de vida muy corto.

Basado en este nuevo concepto, al derivar la aceleración de un perfil de velocidad trapezoidal se obtienen los puntos de cambio jerk siendo estos pulsos de área infinita y produciendo daños a largo plazo en los sistemas mecánicos.

Aplicando el perfil Double-S para la trayectoria, es posible limitar el jerk en los movimientos realizados por los actuadores.

Antes de realizar el cálculo de la trayectoria es preciso evaluar si es posible la realización de la misma con los parámetros establecidos de velocidad inicial, velocidad final, aceleración máxima y jerk máximo. Para este propósito se define el tiempo promedio de alcance dado por la ecuación 4.8

$$T_j^* = \min \left\{ \sqrt{\frac{|v_1 - v_0|}{j_{max}}}, \frac{a_{max}}{j_{max}} \right\} \quad (4.8)$$

Si el tiempo promedio es igual a $\frac{a_{max}}{j_{max}}$ entonces la aceleración alcanzará su máximo valor y la trayectoria tendrá intervalos con jerk igual a cero.

Para evaluar si la trayectoria se puede alcanzar con los parámetros especificados se debe cumplir la desigualdad 4.9 [7]

$$q_1 - q_0 > \begin{cases} T_j^*(v_0 + v_1), & \text{si } T_j^* < \frac{a_{max}}{j_{max}} \\ \frac{1}{2}(v_0 + v_1) \left[T_j^* + \frac{|v_1 - v_0|}{a_{max}} \right], & \text{si } T_j^* = \frac{a_{max}}{j_{max}} \end{cases} \quad (4.9)$$

Al realizar la trayectoria se pueden presentar dos casos en el perfil general de velocidad. El primero se presenta cuando la velocidad máxima alcanzada v_{lim} es igual a la velocidad máxima ingresada v_{max} . El segundo caso se presenta cuando v_{lim} es menor a v_{max} es decir no se alcanzó la velocidad propuesta.

Lamentablemente solo es posible determinar v_{lim} luego de calcular los parámetros de la trayectoria.

De acuerdo con lo mostrado en la *figura* 4.8, la trayectoria es dividida en los siguientes intervalos:

T_{j1} : Periodo de jerk constante en la fase de aceleración.

T_{j2} : Periodo de jerk constante en la fase de desaceleración.

T_a : Periodo de jerk igual a cero con aceleración constante.

T_v : Periodo de jerk igual a cero con velocidad constante.

T_d : Periodo de jerk igual a cero con desaceleración constante.

T : Periodo total de la trayectoria donde $T = T_a + T_v + T_d$.

De acuerdo a la definición de estos periodos es posible considerar

únicamente él caso donde $v_{lim} = v_{max}$, donde se calcula T_v con las ecuaciones 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14:

$$T_{j1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{v_{max}-v_0}{j_{max}}}, & \text{si } (v_{max} - v_0)j_{max} < a_{max}^2 \\ \frac{a_{max}}{j_{max}}, & \text{si } (v_{max} - v_0)j_{max} \geq a_{max}^2 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$T_a = \begin{cases} 2T_{j1}, & \text{si } (v_{max} - v_0)j_{max} < a_{max}^2 \\ T_{j1} + \frac{v_{max}-v_0}{a_{max}}, & \text{si } (v_{max} - v_0)j_{max} \geq a_{max}^2 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$T_{j2} = \begin{cases} \sqrt{\frac{v_{max}-v_1}{j_{max}}}, & \text{si } (v_{max} - v_1)j_{max} < a_{max}^2 \\ \frac{a_{max}}{j_{max}}, & \text{si } (v_{max} - v_1)j_{max} \geq a_{max}^2 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$T_d = \begin{cases} 2T_{j2}, & \text{si } (v_{max} - v_1)j_{max} < a_{max}^2 \\ T_{j2} + \frac{v_{max}-v_1}{a_{max}}, & \text{si } (v_{max} - v_1)j_{max} \geq a_{max}^2 \end{cases} \quad (4.13)$$

$$T_v = \frac{q_1 - q_0}{v_{max}} - \frac{T_a}{2} \left(1 + \frac{v_0}{v_{max}}\right) - \frac{T_d}{2} \left(1 + \frac{v_1}{v_{max}}\right) \quad (4.14)$$

Por deducción se concluye que se tiene un periodo de velocidad constante si T_v es mayor que cero, de lo contrario los parámetros de la trayectoria deben ser reevaluados para el caso en que $v_{lim} < v_{max}$ presentado en la *figura* 4.9 y dado por las ecuaciones 4.15, 4.16, 4.17, 4.18:

$$T_{j1} = T_{j2} = T_j = \frac{a_{max}}{j_{max}} \quad (4.15)$$

$$T_a = \frac{\frac{a_{max}^2}{j_{max}} - 2v_0 + \sqrt{\Delta}}{2a_{max}} \quad (4.16)$$

$$T_d = \frac{\frac{a_{max}^2}{j_{max}} - 2v_1 + \sqrt{\Delta}}{2a_{max}} \quad (4.17)$$

$$\Delta = \frac{a_{max}^4}{j_{max}^2} + 2(v_0^2 + v_1^2) + a_{max} \left(4(q_1 - q_0) - 2 \frac{a_{max}}{j_{max}} (v_1 + v_0) \right) \quad (4.18)$$

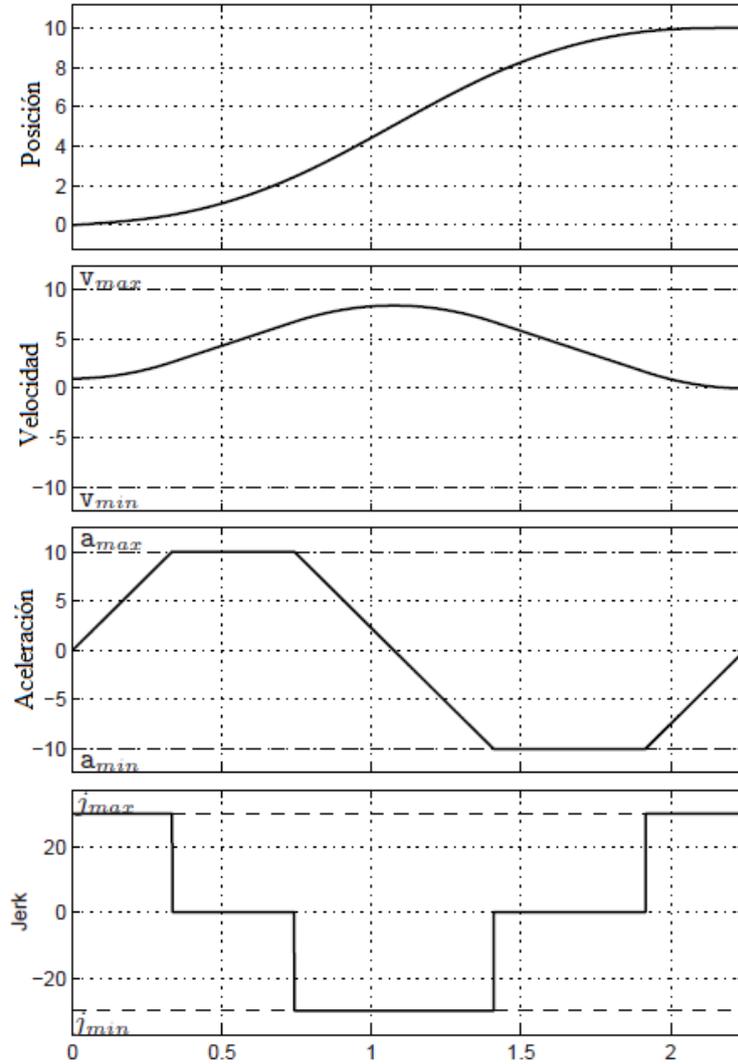


Figura 4.9: Posición, velocidad, aceleración y jerk sin alcanzar v_{max} [7].

Dados los tiempos necesarios en cada fase de la trayectoria es posible obtener los parámetros con las ecuaciones 4.19, 4.20, 4.21:

$$a_{lim_a} = j_{max} T_{j1} \quad (4.19)$$

$$a_{lim_d} = -j_{max} T_{j2} \quad (4.20)$$

$$v_{lim} = v_0 + (T_a - T_{j1}) a_{lim_a} = v_1 - (T_d - T_{j2}) a_{lim_d} \quad (4.21)$$

Solamente después de obtener los parámetros establecidos por los tiempo en las distintas fases de la trayectoria es posible calcular la trayectoria tal como muestra Biagiotti y Melchiorri [7] con las ecuaciones 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 evaluadas para cada instante de la trayectoria:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + v_0 t + j_{max} \frac{t^3}{6}, & 0 \leq t < T_{j1} \\ q_0 + v_0 t + \frac{a_{lim_a}}{6} (3t^2 - 3T_{j1}t + T_{j1}^2), & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ q_0 + (v_{lim} + v_0) \frac{T_a}{2} - v_{lim} (T_a - t) - j_{min} \frac{(T_a - t)^3}{6}, & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ q_0 + (v_{lim} + v_0) \frac{T_a}{2} + v_{lim} (t - T_a), & T_a \leq t < T_a + T_v \\ q_1 - (v_{lim} + v_1) \frac{T_d}{2} + v_{lim} (t - T + T_d) - j_{max} \frac{(t - T + T_d)^3}{6}, & T - T_d \leq t < T - T_d + T_{j2} \\ q_1 - (v_{lim} + v_1) \frac{T_d}{2} + v_{lim} (t - T - T_d) + \\ + \frac{a_{lim_d}}{6} (3(t - T + T_d)^2 - 3T_{j2}(t - T + T_d) + T_{j2}^2), & T - T_d + T_{j2} \leq t < T - T_{j2} \\ q_1 - v_1 (T - t) - j_{max} \frac{(T - t)^3}{6}, & T - T_{j2} \leq t < T \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} v_0 + j_{max} \frac{t^2}{2}, & 0 \leq t < T_{j1} \\ v_0 + a_{lim_a} \left(t - \frac{T_{j1}}{2} \right), & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ v_{lim} + j_{min} \frac{(T_a - t)^2}{2}, & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ v_{lim}, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ v_{lim} - j_{max} \frac{(t - T + T_d)^2}{2}, & T - T_d \leq t < T - T_d + T_{j2} \\ v_{lim} + a_{lim_d} \left(t - T + T_d - \frac{T_{j2}}{2} \right), & T - T_d + T_{j2} \leq t < T - T_{j2} \\ v_1 + j_{max} \frac{(T - t)^2}{2}, & T - T_{j2} \leq t < T \end{cases} \quad (4.23)$$

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} j_{max}t, & 0 \leq t < T_{j1} \\ j_{max}T_{j1} = a_{lim_a}, & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ -j_{min}(T_a - t), & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ 0, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ -j_{max}(t - T + T_d), & T - T_d \leq t < T - T_d + T_{j2} \\ -j_{max}T_{j2} = a_{lim_d}, & T - T_d + T_{j2} \leq t < T - T_{j2} \\ -j_{max}(T - t), & T - T_{j2} \leq t < T \end{cases} \quad (4.24)$$

$$q^{(3)}(t) = \begin{cases} j_{max}, & 0 \leq t < T_{j1} \\ 0, & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ j_{min} = -j_{max}, & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ 0, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ j_{min} = -j_{max}, & T - T_d \leq t < T - T_d + T_{j2} \\ 0, & T - T_d + T_{j2} \leq t < T - T_{j2} \\ j_{max}, & T - T_{j2} \leq t < T \end{cases} \quad (4.25)$$

Para simplificar el cálculo de perfil de trayectorias doble S, se basa en una formulación de trayectorias en tiempo discreto siendo ideal para definir trayectorias complejas compuestas por varios segmentos dobles S, siendo apropiadas para el funcionamiento de CNC.

En la *figura 4.10* se puede ver un diagrama de bloques para calcular el perfil de jerk, para ello se define las condiciones iniciales que son los valores iniciales y finales de posición, velocidad y aceleración más los valores de limitación que son (v_{max} , v_{min} , a_{max} , a_{min} , j_{max} , j_{min}), todo esto es para definir los valores de posición, velocidad, aceleración y jerken un instante k -ésimo y un T_s de periodo de muestreo.

Una vez que se ha obtenido el valor de jerk se integra tres veces para obtener los valores de aceleración, velocidad y posición respectivamente como se puede ver en las ecuaciones *ecuaciones 4.26, 4.27 y 4.28*.

$$\ddot{q}_k = \ddot{q}_{k-1} + \frac{T_s}{2} \left(q_{k-1}^{(3)} + q_k^{(3)} \right) \quad (4.26)$$

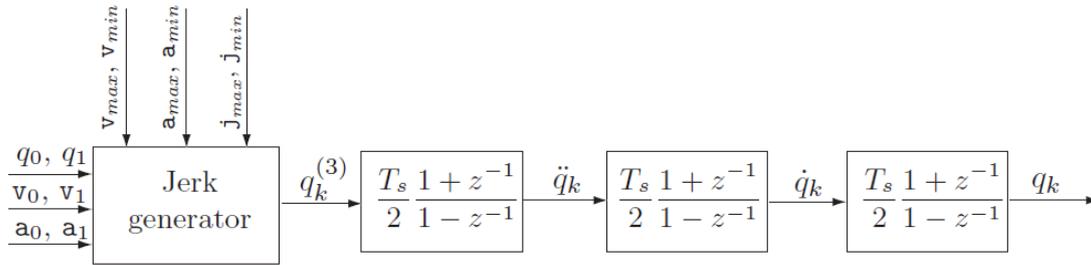


Figura 4.10: Diagrama de bloques para la planificación de trayectorias [7].

$$\dot{q}_k = \dot{q}_{k-1} + \frac{T_s}{2} (\ddot{q}_{k-1} + \ddot{q}_k) \quad (4.27)$$

$$q_k = q_{k-1} + \frac{T_s}{2} (\dot{q}_{k-1} + \dot{q}_k) \quad (4.28)$$

Básicamente este planificador de trayectorias trata de que el sistema sea más eficiente al momento de acelerar al máximo y mantener velocidades constantes en diferentes segmentos de la trayectoria, hasta que sea el momento exacto para disminuir la aceleración y poder llegar al punto final con los valores de las condiciones iniciales de aceleración y velocidad, por lo que el cálculo de trayectorias está compuesto por dos fases:

1. Un perfil de aceleración se calcula con la aceleración trapezoidal clásica, posiblemente seguido de una fase de velocidad constante (= vmax).
2. Durante el movimiento, en cada instante de tiempo kT_s , se comprueba si es posible la deceleración de la velocidad final v_1 para poder llegar a \dot{q}_k con la velocidad deseada, siempre y cuando cumpla con las limitaciones de \ddot{q}_k y $\ddot{\ddot{q}}_k^3$, y con el objetivo de alcanzar a los puntos exactos de q_1 .

4.2 Protocolos de comunicación.

Una vez que se ha realizado el estudio de la arquitectura física del sistema (módulos de control y potencia, actuadores a manipular), el análisis cinemático (de la parte mecánica de la CNC láser) y elaborado el algoritmo de control, se debe ver la manera para comunicar la parte de software que se encuentra en el CPU del computador,

donde se lee la información de entrada, siendo estos los diseños a realizar, los cuales son procesados para generar datos de dirección, control y potencia para poder manipular el hardware que es la máquina-herramienta.

Antes de continuar se debe tener claro que un protocolo consiste de un conjunto de reglas establecidas para cumplir un mismo objetivo, en el caso del protocolo de comunicación, de igual forma se tiene establecidas varias reglas para poder comunicarse dentro de un mismo lenguaje por así decirlo, dependiendo el medio de trabajo y los equipos que se desean comunicar estas reglas pueden ir cambiando, pero al final se cumple con el objetivo final que es de establecer una comunicación segura.

Cuando se desea controlar varias entradas y salidas desde un mismo ordenador es preferible utilizar buses de comunicación estos pueden ser seriales o paralelos, todo depende de la aplicación y la necesidad que se tenga al momento de realizar la comunicación. En el caso de la CNC láser como ya se indicó en la sección 2, se tiene una tarjeta de expansión la cual ayuda a controlar todas las entradas y salidas que se tenga en el sistema.

El protocolo de comunicación USB queda totalmente descartado por los requisitos necesarios que se debe cumplir con el sistema, como se sabe la comunicación usb se destaca por la rapidez y la cantidad de información que puede enviar en periodos de tiempo muy cortos, pero no cumple con el protocolo de determinismo, lo cual es imprescindible para el proyecto que se está realizando.

4.2.1 Tipo de buses de comunicación.

Los buses de comunicación son más conocidos como buses de expansión o buses periféricos, los cuales brindan la facilidad de conectar tarjetas de expansión para facilitar el control en el ordenador. Se tiene diferentes tipos de buses internos estándar los cuales se caracterizan por [31]:

- Su Forma.
- El numero de clavijas del conector.
- Los tipos de señales (frecuencias, datos, etc).

Con el pasar los años cada uno de los buses han ido evolucionando gracias al avance científico, a continuación se presenta los diferentes tipos de buses paralelos.

- Bus ISA (Arquitectura Estándar de la Industria).
- Bus MCA (Arquitectura de Microcanal).
- Bus EISA (Arquitectura Estándar Industrial Extendida).
- Bus Local.
- Bus VLB (Bus Local VESA).
- Bus PCI (Interconexión de Componentes Periféricos).

Para mayor información sobre cada uno de los buses indicados anteriormente y otros más se puede revisar [31]y [8]

Una ventaja que se tiene para la selección del protocolo de comunicación, es tener como dato que la CNC láser trabaja con un sistema operativo en tiempo real, el cual tiene como característica, obtener resultados de procesamiento en tiempos tan cortos como sean posibles, siendo este un limitante para ciertos protocolos, otra característica que impone el sistema operativo con el que se está trabajando, es que debe cumplir con el requisito de ser determinista, limitando aun más los protocolos de comunicación.

Teniendo presente los requisitos que debe cumplir el bus de comunicación, el más adecuado es el bus PCI por sus características, cumpliendo con una alta velocidad de transferencia de datos y el poder trabajar con sistemas operativos deterministas.

4.2.2 Bus PCI.

El bus PCI fue desarrollado por Intel, el cual está diseñado explícitamente para conectar diferentes tipos de componentes tales como controladores de periféricos, sistemas periféricos de tarjetas adicionales y sistemas procesadores/memoria. Se tiene diferentes tipos de buses PCI como son [8]:

- PCI-X.

- PCI Exprés 16.
- PCI.
- AGP.
- PCI Exprés 1.

El bus PCI se puede dividir en dos puntos, un bus de 32 bits y otro de 64 bits los cuales trabajan con frecuencias de 33MHz y 66MHz respectivamente, como se puede ver el bus PCI tiene un gran ancho de banda con un protocolo plug and play, lo cual le permite cumplir con un mejor desempeño en cuanto a la gran cantidad de demanda de los diferentes componentes periféricos de alto desempeño [11].

4.2.2.1 Conectores bus PCI.

Se debe tener cuidado al momento de elegir el tipo de conector del bus, estos se diferencian por el nivel de voltaje de las señales con las que se está trabajando. Niveles de voltajes de las señales [31]:

- 3.3v para computadoras portátiles,
- 5.0v para computadoras de escritorio.

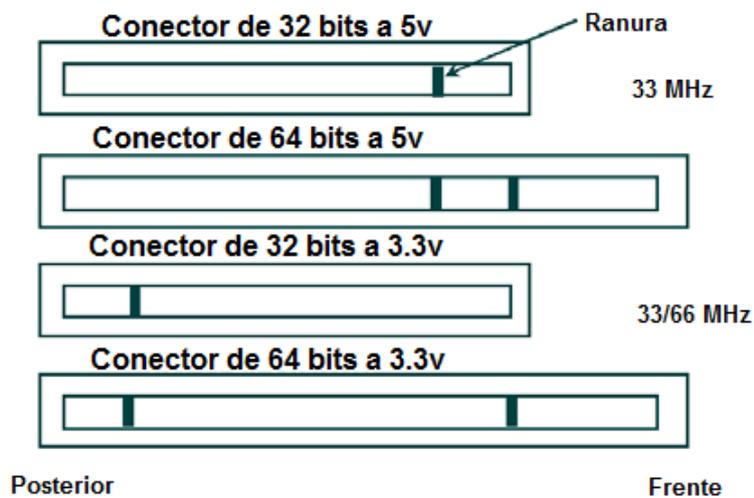


Figura 4.11: Conectores para Bus PCI de 32bits y 64 bits [8].

Los conectores que trabajan a 3.3v se diferencian de los de 5.0v por la guía de conexión (ranura), los conectores de 5v tienen la ranura al lado derecho mientras que los de 3.3v la ranura están en la parte izquierda como se puede ver en la *figura 4.11*.

Como ya se explicó, el valor de los voltajes de las señales van a depender del tipo de ordenador con el que se va a trabajar, para el caso de la CNC láser se aplicara los un bus PCI de 32 bits con valores de señales de 5v.

4.2.3 Bus PCI síncrono.

Una de las características del bus PCI es que cumple con las condiciones del protocolo síncrono, lo cual hace que se trabaje mediante señales de reloj, siendo señales periódicas y repetitivas, estas indican cuando efectuar alguna acción como leer, escribir o cuantos ciclos se debe mantener con la señal actual.

Al trabajar con buses síncronos las señales son leídas generalmente en los flancos de subida o bajada [9], en la *figura 4.12* se puede apreciar el momento de la transmisión de señales en el bus PCI, y en la *figura 4.13* se puede apreciar el proceso para iniciar una sincronización de una señal.

Al trabajar con protocolos síncronos se debe tener mucho cuidado, ya que todos los dispositivos (maestros y esclavos) que están conectados al sistema por lo general trabajan con la misma señal de reloj, y si algún dispositivo se encuentra a una distancia mayor de la longitud máxima requerida, se puede producir desincronización en el sistema y más aún si se trabaja con frecuencias elevadas como es el caso de los buses PCI, para mayor información se puede revisar [9].

Al trabajar con diferentes dispositivos los cuales están conectados al bus se debe tener muy en cuenta la velocidad de transferencia de cada uno, ya que el de menor velocidad va a establecer la tasa de transferencia. Otro punto importante es la longitud del bus, este está limitado por el máximo clock de skew (deslizamiento) admisible. Por ejemplo, en un bus PCI el máximo clock skew admisible es de 2ns, para un clock de 33MHz (periodo de 30 ns) [10].

El ciclo del bus no puede ser menor al tiempo de propagación de las señales del bus, si se tiene una frecuencia de 100MHz, las señales tiene un lapso de tiempo de $1/f$ dando como resultado 10ns [10].

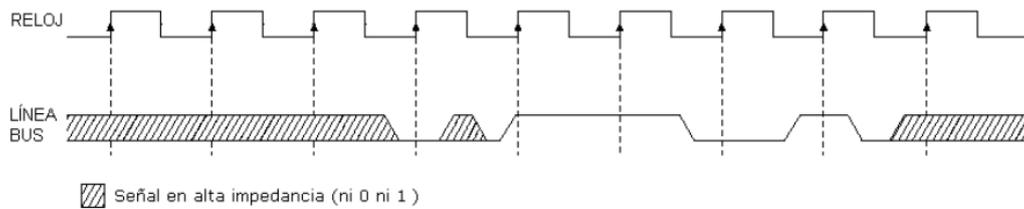


Figura 4.12: Lectura de señales sincronizadas [9].

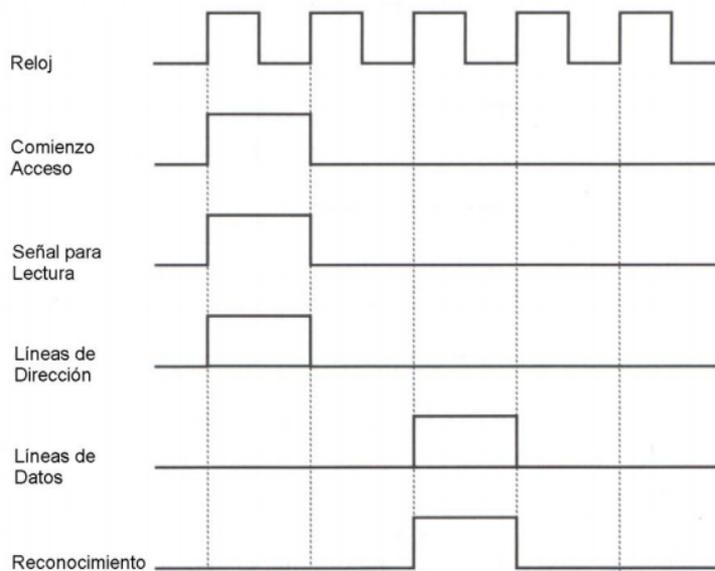


Figura 4.13: Proceso para la sincronización de señales [9].

4.2.4 Fundamentos del protocolo PCI.

El mecanismo de transferencia del protocolo bus PCI está basado en transferencias de modo ráfaga o modo bloque más conocido como modo burst, donde se necesita una fase para la dirección seguida de una o varias fases para datos, el protocolo del bus PCI soporta este tipo de transferencia solo para entradas y salida de información y almacenamiento de datos en la memoria [11].

Se debe tener mucho cuidado al momento de crear el tamaño de los bloques a transmitir en este tipo de modo de transferencia, el incremento excesivo del tamaño del bloque puede traer consecuencias contraproducentes como el incremento del tiempo de espera máxima que un maestro de alta prioridad debe esperar para tomar el control del bus.

Al tener transferencias en grandes cantidades es importante poder controlar, el

cómo se va a transferir y en que lapsos de tiempo se va a realizar, logrando así tener transferencias ordenadas y evitar una monopolización del uso del canal de transmisión. Para lograr este control se tiene la arbitración que es el mecanismo que controla estos parámetros de orden y tiempos de transmisión.

Una de las ventajas para ganar tiempo al momento de decidir que dispositivo va a ser el siguiente en transmitir es, cuando otro dispositivo ya está en el proceso de transmisión el árbitro del bus PCI está negociando con un dispositivo indicador para ver que dispositivo está listo para transmitir, a este proceso se lo llama árbitro oculto [11], en la *figura 4.14* se puede ver un ejemplo de arbitración.

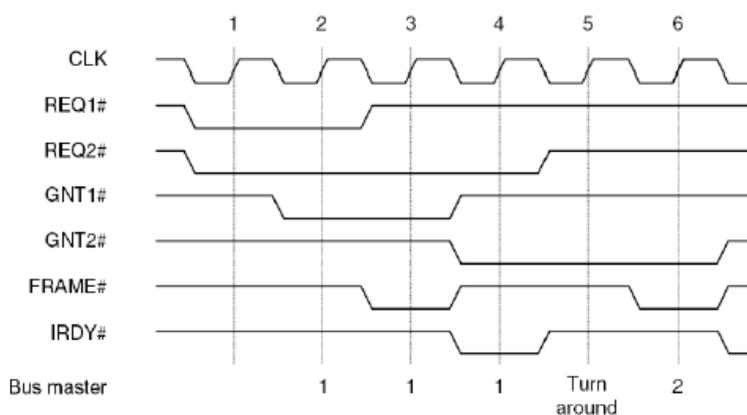


Figura 4.14: Ejemplo de arbitración en el bus PCI [10].

En cuanto al direccionamiento se tiene acceso a tres espacios como son [11]:

1. **Memoria:** Acceso de hasta 4GB.
2. **E/S:** Acceso de hasta 4GB.
3. **Configuración:** se divide en espacios de configuración por el controlador PCI formado por 64 palabras dobles.

Los espacios de memoria y E/S están designados específicamente para direccionamientos de periféricos organizados en un mapa de memoria, mientras que el espacio de configuración es usado por el sistema operativo para inicializar y configurar los diferentes dispositivos PCI. Es recomendable que todos los dispositivos sean mapeados en espacio de memoria.

Todo dispositivo PCI se caracteriza por tener un espacio de configuración de 256 bytes donde se tiene un encabezado de 64 bytes, el encabezado está compuesto

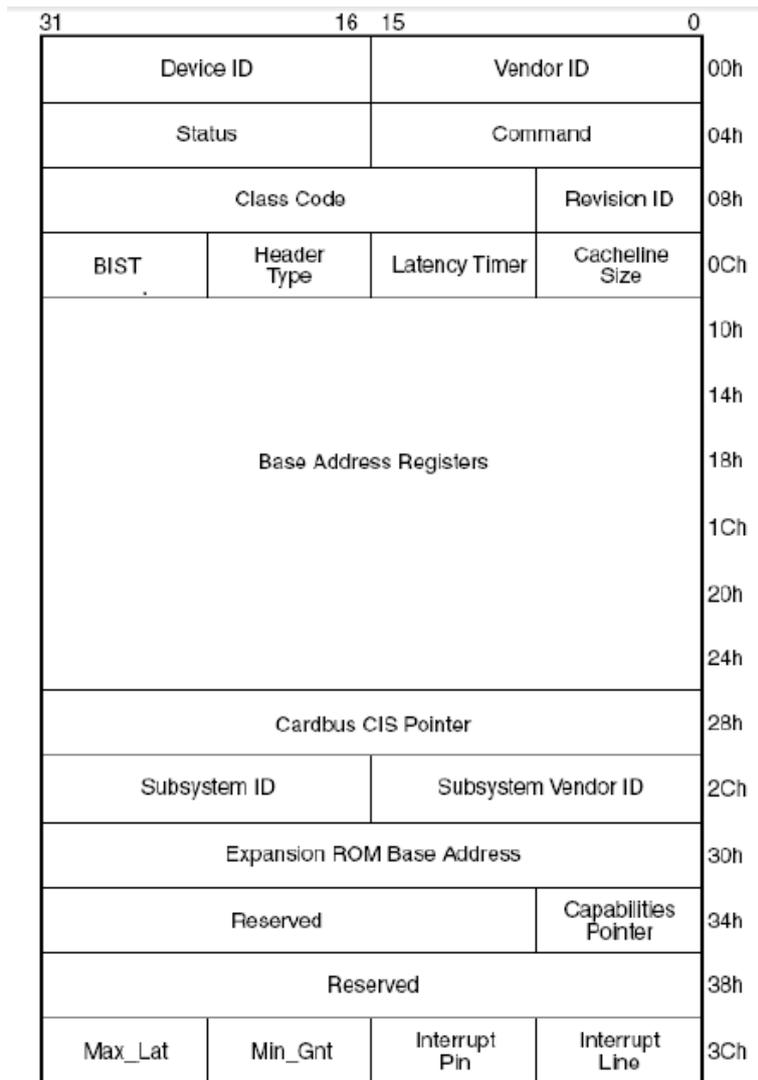


Figura 4.15: Ejemplo de encabezado del espacio de configuración PCI [10].

por la identificación y configuración el resto del espacio es para el dispositivo, en la *figura 4.15* se puede ver un ejemplo de encabezado para el espacio de configuración PCI [10]. Para mayor información sobre el protocolo de un bus PCI se puede revisar el estándar 3.0 del bus local PCI.

4.2.5 Características bus PCI.

Como principales características se tienen:

- **Independencia del procesador:** Se aísla el diseño del dispositivo con respecto a posibles actualizaciones del procesador, por especificaciones del

estándar PCI.

- **Soporte de varias funciones:** Tiene aproximadamente un soporte de 80 funciones PCI por bus.
- **Bajo consumo de potencia:** Tiene un bajo consumo de corriente.
- **Transferencias en modo burst:** Las transferencias de lectura y escritura son realizadas en modo ráfagas, logrando velocidades máximas de transferencia de 132Mbytes/seg.
- **Velocidad del bus:** La revisión 3.0 da soporte para velocidades de 33 MHz.
- **Tiempo de acceso:** 60ns par una velocidad del bus de 33 MHz.
- **Soporte de bus maestro:** Se está ejecutando mientras otro maestro del bus está memoria principal y dispositivos de expansión a través de los puentes PCI-PCI.
- **Arbitración del bus oculta:** Se está ejecutando mientras otro maestro del bus está realizando una transferencia sobre el bus PCI, no pierde tiempo en la selección.
- **Chequeo integral de todas las transacciones:** Se realiza una revisión de la paridad en la dirección de datos y en los comandos de forma integral.
- **Tres espacios de direcciones:** Acceso al espacio de Memoria, entradas/salidas y configuración de direcciones.
- **Autoconfiguración:** Configuración total de los registros necesarios para soportar detección y configuración automática de dispositivos.

4.2.6 Tipo de señales del bus PCI.

Se debe tener presente los tipos de señales que se manejan en el protocolo del bus PCI, en la *tabla 4.1* se muestra los diferentes tipos de señales.

Tabla 4.1: Tipo de señales que maneja un BUS PCI [11].

Tipo de Señal	Función
in	Entradas estándar
out	Salida tótem-pole
t/s	Entrada/salida tri-estado bidireccional
s/t/s	Tri-estado mantenido
o/d	Drenador abierto, necesita resistencias de pull-up

En la *figura 4.16* se puede ver como están agrupados los pines de un bus PCI con sus respectivas señales y dirección.

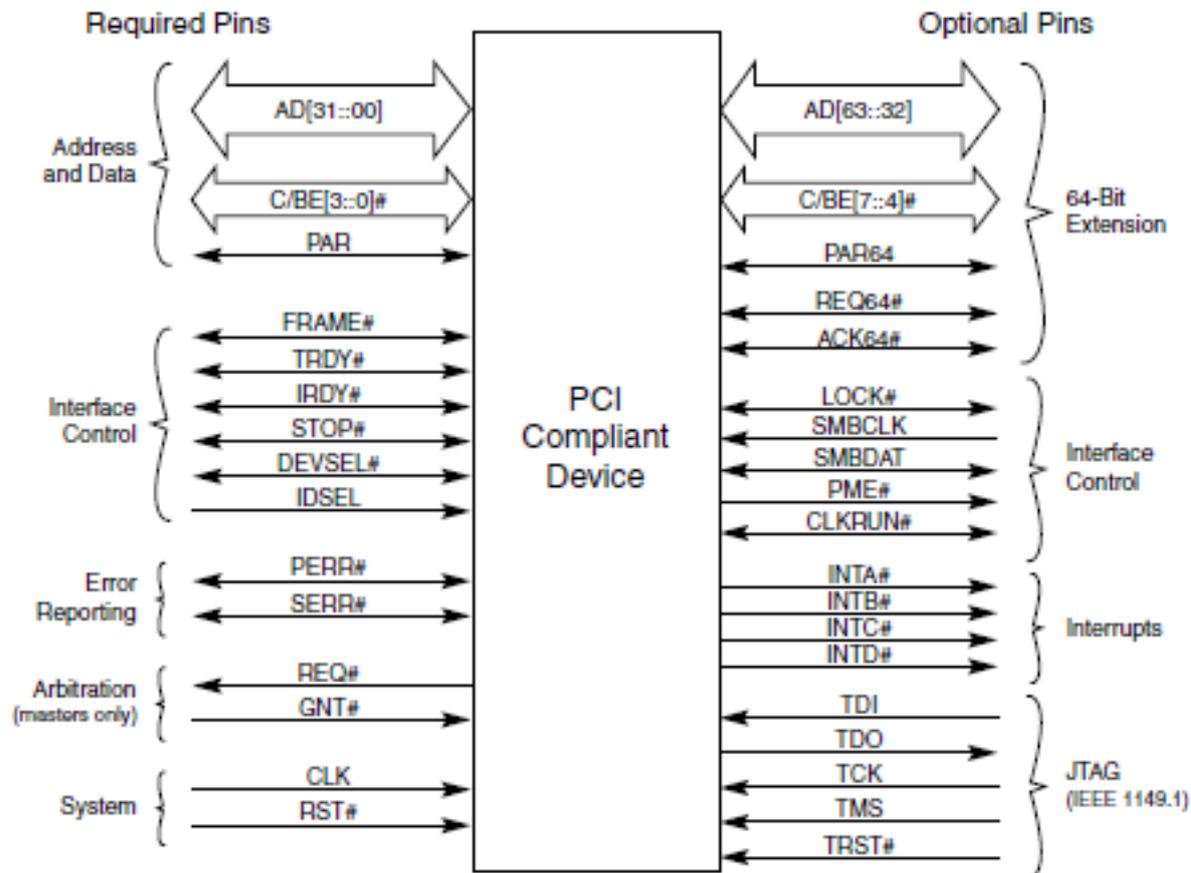


Figura 4.16: Pines del PCI [11].

4.2.6.1 Función de señales del bus PCI.

Como se puede ver en la *tabla 4.1* existen diferentes tipos de señales para el protocolo de comunicación de un bus PCI, donde cada tipo de señal puede ejecutar diferentes tipos de funciones, en las *tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6* se muestran las más importantes para el bus PCI de 32 bits a 33 MHz.

Tabla 4.2: Señales del Sistema [11].

Señal	Descripción	Tipo de Señal
CLK	<i>Clock</i> Señal de reloj del bus PCI.	In
RST#	<i>Reset</i> Restablece o inicializa todos los registros, secuencias y señales.	In

Tabla 4.3: Señales de Dirección y Datos [11].

Señal		Descripción	Tipo de Señal
AD[31:0]	<i>Address & Data</i>	Bus multiplexado de dirección y datos, se produce la transacción del Bus PCI.	t/s
C/BE[3:0]	<i>Bus Command and Bytes Enables</i>	Multiplexados en el mismo pin, indica la operación a realizar, define la orden y habilitación de bytes para datos y dirección.	t/s
PAR	<i>Parity</i>	Paridad de AD y C/BE.	t/s

Tabla 4.4: Señales de Control [11].

Señal		Descripción	Tipo de Señal
FRAME#	<i>Cycle Frame</i>	El maestro activa para iniciar un acceso.	s/t/s
IRDY#	<i>Initiator Ready</i>	Activada por el maestro, indica si existe un dato valido en el bus AD en un ciclo de escritura, en un ciclo de lectura indica el maestro que está listo para recibir un dato. Puede trabajar junto con la señal TRDY#	s/t/s
TRDY#	<i>Target Ready</i>	En lectura indica si existe un dato valido en el bus AD, mientras que en escritura se prepara para recibir un ato, el maestro le activa en ambos casos.	s/t/s
STOP#	<i>Stop</i>	El esclavo le indica al maestro que la transacción se termino.	s/t/s
IDSEL#	<i>Initialization Device Select</i>	Es como un chip select, cuando se realiza una transacción de escritura o lectura de configuración.	in
DEVSEL#	<i>Devide Select</i>	Indica el esclavo al maestro cuando el dispositivo activado tiene decodificada su dirección de acceso.	s/t/s

Tabla 4.5: Señales de Arbitraje [11].

Señal		Descripción	Tipo de Señal
REQ#	<i>Request</i>	El maestro pide el arbitrio del bus.	t/s
GNT#	<i>Grant</i>	Activa el árbitro para dar acceso al maestro.	t/s

Tabla 4.6: Señales de Estado [11].

Señal		Descripción	Tipo de Señal
PERR#	<i>Parity Error</i>	Indica cuando se produce un error de paridad durante la transacción PCI, menos en ciclos especiales.	s/t/s
SERR#	<i>Sistem Error</i>	Indica cuando se producen errores de paridad sobre ciclos especiales o cualquier otro error del sistema.	o/d

CAPÍTULO 5

PRUEBAS DEL SISTEMA

En el presente capítulo se realizará diversas pruebas de trayectorias para ver el comportamiento de todo el sistema, para ello se ha realizado trayectorias con formas lineales, circulares y sus combinaciones donde se puede apreciar el comportamiento de la velocidad y la resolución crítica de los motores tanto del eje X como del eje Y.

En la *figura 5.1* se puede apreciar cómo está construido el prototipo para la máquina CNC láser. Donde se tiene una base de madera, la cual soporta todo el peso de la estructura mecánica; los controladores de los motores más la tarjeta de expansión van colocados dentro de la base, así solo llegara el cable de datos de la tarjeta PCI a la máquina, lo cual es ideal para no tener demasiados cables entre el manipulador y la PC.

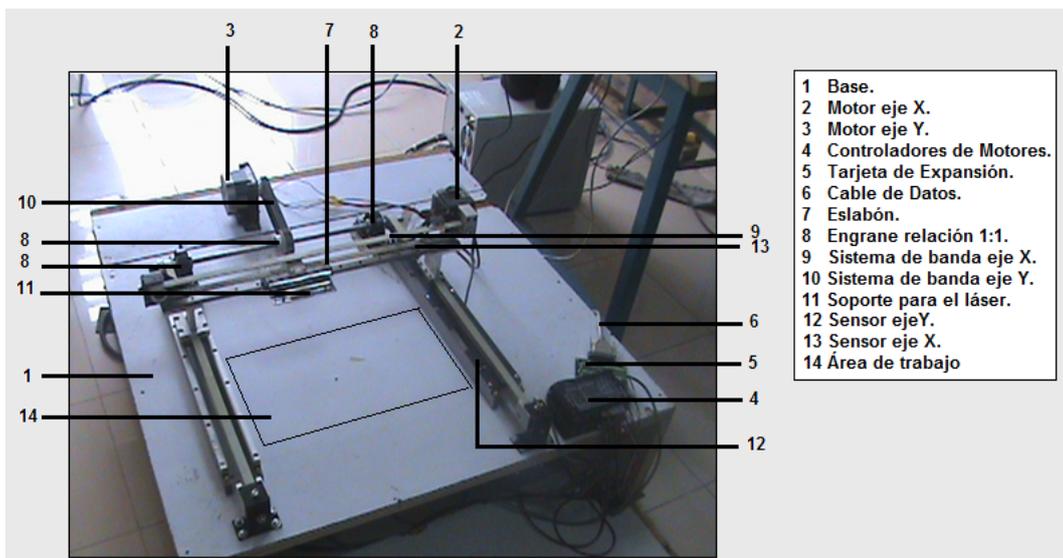


Figura 5.1: Estructura CNC láser.

En cuanto, a cómo está construida mecánicamente la CNC láser; se tiene un motor sobre la base y en la parte posterior de la estructura mecánica, el cual controla



Figura 5.2: Sistema de tracción eje X.



Figura 5.3: Sistema de tracción eje Y.

el movimiento en el eje Y, para lograr dicho movimiento se ha acoplado un sistema de bandas con engranes, manteniendo una relación de transmisión 1:1 (ver *figura 5.3*), el segundo motor está colocado en la parte derecha de la estructura mecánica y a la misma altura del eslabón, de igual forma que en el caso anterior para realizar el movimiento en el eje X se tiene un sistema de banda con una relación transmisión de 1:1 (ver *figura 5.2*).

En la parte de control para el manejo de la CNC láser se ha desarrollado una interfaz completamente amigable para el usuario y de fácil manejo, para ello es necesario seguir un pequeño procedimiento para poder efectuar los diferentes cortes, en la *figura 5.4* se puede ver la interfaz. En la parte inferior derecha del recuadro negro (que es donde se visualiza el diseño que se desea cortar) se tiene cuatro botones que son:

1. Encendido del sistema.
2. Alimentación de motores.
3. Reconocimiento de inicio (HOME).
4. Limpiar pantalla en caso de tener un diseño precargado.

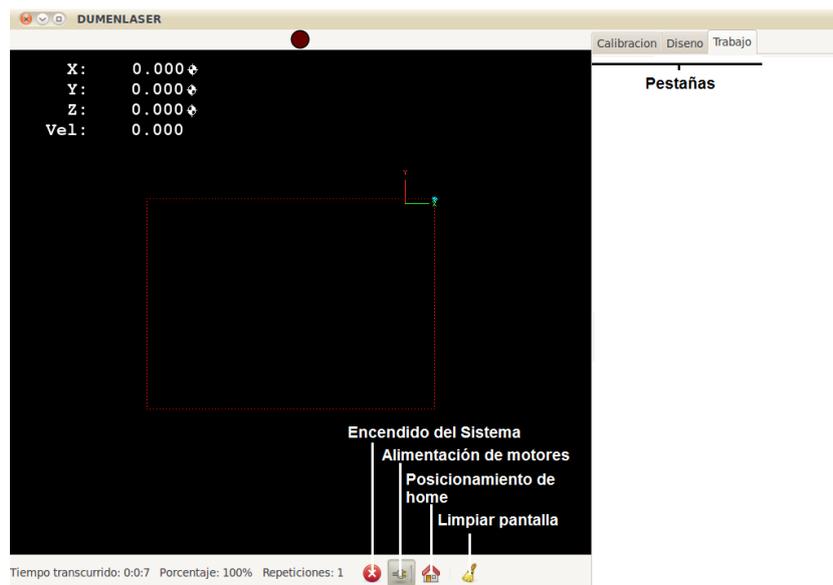


Figura 5.4: Interfaz del Sistema.

En el recuadro negro se tiene un área delimitada con línea roja, la cual indica el área de trabajo que tiene la máquina, lo cual ayuda a verificar que el diseño no sobrepase los límites de trabajo; en caso que el diseño cargado al sistema sea mayor al área de trabajo o simplemente se encuentre fuera del área indicada el sistema CNC láser no ejecutara el corte. De igual forma en la parte superior izquierda se puede visualizar las coordenadas en la que se encuentra la herramienta, la potencia de corte y la velocidad a la que se esta desplazando.

Una vez que se ha encendido el sistema, alimentado los motores y realizado un home (posicionamiento de la herramienta en el punto de inicio) está listo el sistema para empezar a trabajar, por lo que se tiene en la parte superior derecha del recuadro negro una barra con tres pestañas como son:

Calibración: Al trabajar con un láser que corte solo material orgánico se tiene una gran variedad de materiales, los cuales presentarán diferente resistencia de material (materiales más blandos o más duros), por lo que en esta pestaña de calibración es donde se realizan las pruebas de corte para obtener la velocidad y potencia más adecuada para realizar el trabajo final, para ello se tiene botones de calibración tanto para velocidad y potencia. Cuando este establecido los valores de velocidad y potencia se presiona el botón de Test de Corte el cual realiza un corte de prueba de un diseño preestablecido en el sistema.

Diseño: Básicamente en ésta opción solo se puede realizar la acción de selección y carga del diseño que se desea cortar, el diseño debe estar ya configurado con

los valores de potencia y velocidad obtenidos con la calibración.

Trabajo: En cuanto a la pestaña de trabajo se tiene la opción de manipular el movimiento de los ejes (izquierda, derecha, arriba y abajo) para colocar la herramienta (láser) sobre el punto cero, que es donde se va a empezar a cortar el material. Una vez llegado a este punto se puede decir que el sistema está listo para trabajar por lo que en la misma pestaña se tiene el botón en la parte inferior de inicio de corte, pause y detener, ver *figura 5.5*.

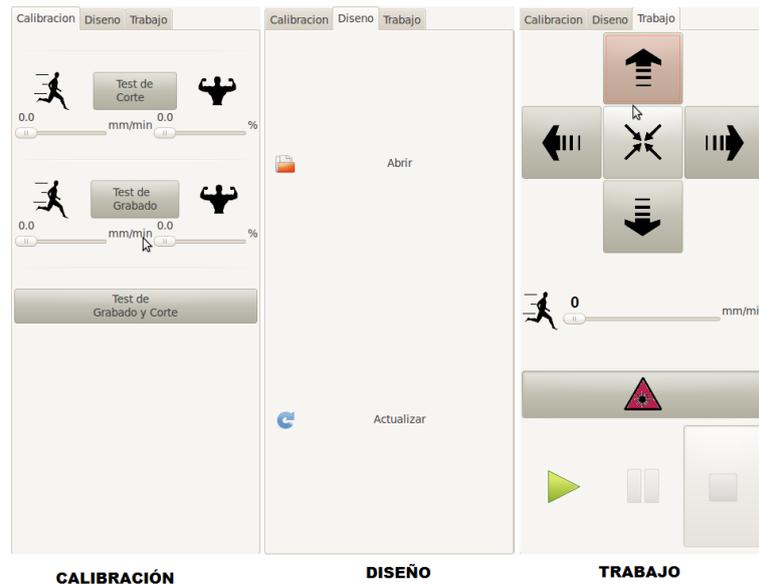


Figura 5.5: Pestañas de la Interfaz.

Teniendo presente la velocidad máxima que puede alcanzar los motores, se ha realizado pruebas de velocidad individual (eje X y eje Y) para poder ver hasta que velocidad es conveniente que trabajen los motores, simplemente por seguridad y garantizar un mayor tiempo de vida de uso de los actuadores. En la *tabla 5.1* se tiene las velocidades máximas y mínimas que soporta cada motor. Al identificar la velocidad máxima de trabajo que puede alcanzar cada motor, se ha implementado en el software de control del sistema láser como dato de restricción así no se podrá sobrepasar dicha velocidad.

Tabla 5.1: Velocidades máxima y mínima de los motores XY.

Motor eje X	Motor eje Y
Vel min: 0 mm/min	Vel min: 0 mm/min
Vel max: 18000 mm/min	Vel max: 18000 mm/min
Resolución: Resolución: 12 micras	Resolución: Resolución: 12 micras

5.1 Desempeño del controlador con trayectorias lineales.

Las pruebas realizadas en esta sección son específicamente trayectorias de líneas rectas, donde se ejecutó movimientos horizontales, verticales y diagonales como se puede ver en la *figura 5.6*, dichas trayectorias deben ser previamente cargadas en el software Corel Draw ya que es donde se puede modificar los parámetros de velocidad y potencia del haz del láser para los diferentes cortes y entrega los archivos con la extensión .ngc (código G).

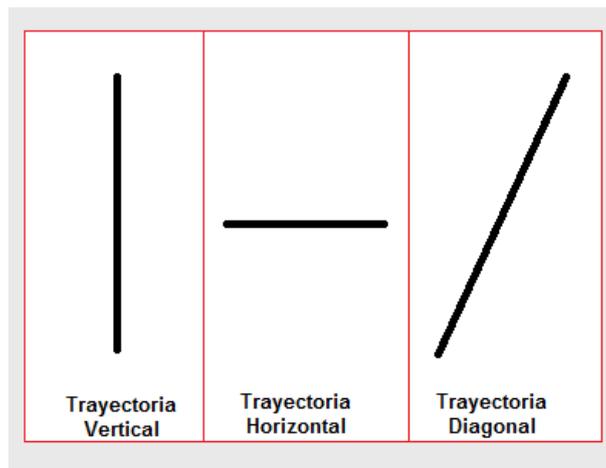


Figura 5.6: Trayectorias lineales.

Se debe tener presente que en estos casos son trayectorias lineales y la velocidad va incrementando progresivamente sin ningún problema, recordando lo indicado en el *capítulo 4 sección 1* se utiliza el algoritmo de control mirar adelante (look ahead), donde una de las características de este algoritmo es mirar un adelantado, así el sistema sabe si la trayectoria ha sufrido alguna variación o continúa con la misma tendencia, dando la facilidad de ir incrementando la velocidad sin ningún inconveniente o ir disminuyendo para poder seguir la trayectoria.

Como ejemplo de trayectoria se ha realizado una línea recta diagonal en Corel Draw donde el usuario debe establecer la velocidad y potencia del haz del láser para ejecutar el corte, recordando que estos parámetros varían dependiendo del material con el que se va a trabajar.

Tabla 5.2: Parámetros de trayectoria lineal.

Trayectoria:	Diagonal
Material:	Madera (trupan)
Velocidad de corte:	800 mm/min
Potencia del haz del láser:	85%

Como se puede ver en la *tabla 5.2* se indica los parámetros principales con los que se va a realizar el corte, mientras que en la *figura 5.7* se puede ver la trayectoria ya cargada en el sistema láser. Recordando lo indicado en la *sección 5.1* ya se ha ejecutado el procedimiento de inicio que es encender el sistema, energizar los motores y reconocimiento de home, lo cual permite colocar la dibujo o trayectoria dentro del área de trabajo, por último se debe colocar la herramienta sobre el punto cero para poder realizar el corte.

En la parte inferior de la interfaz también se puede ver datos como: tiempo total de ejecución de corte, porcentaje de corte (es decir, al terminar de cortar todo la trayectoria se tiene un porcentaje de 100%, en caso que se ha realizado una pausa o paro se puede ver en qué porcentaje se ha realizado dicha acción) y por último cuantas veces se ha ejecutado el mismo corte.

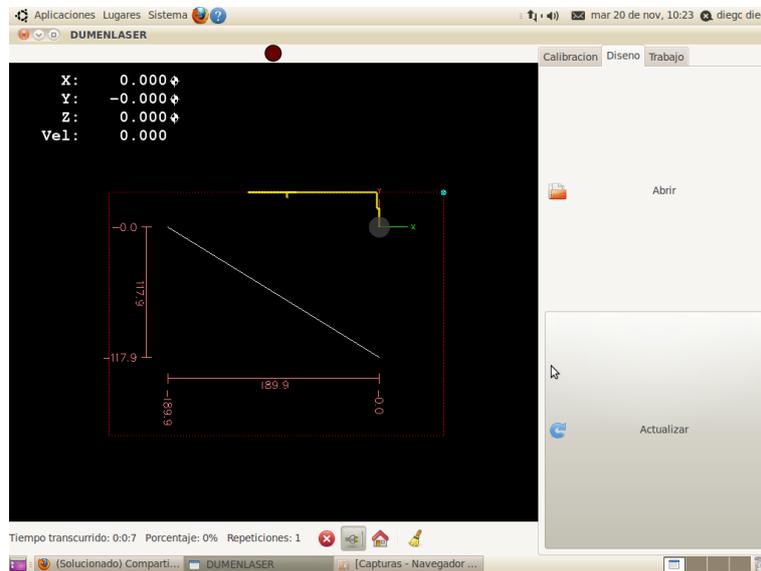


Figura 5.7: Trayectoria lineal-diagonal.

Como se puede ver en la *tabla 5.3* se ha efectuado 4 repeticiones con la misma trayectoria, todas terminadas en su totalidad, dando como resultado un promedio de repetitividad del 99,993% y un tiempo promedio de 17.03 segundos lo cual es una tolerancia de error aceptable.

Tabla 5.3: Resultados de la ejecución de corte lineal.

Trayectoria:	Diagonal			
Material:	Madera (trupan)			
Repeticiones:	1	2	3	4
Porcentaje de trayectoria:	100%	100%	100%	100%
Repetitividad:	-	99.995%	99.990%	99.995%
Tiempo total de ejecución:	17.01 seg.	17.03 seg.	17.05 seg.	17.03 seg.

5.2 Desempeño del controlador con trayectorias circulares.

De igual forma que en la *sección* 5.1 se realizó pruebas del controlador para trayectorias de formas circulares como son círculos, parábolas y óvalos en la *figura* 5.8 se puede ver dichas trayectorias. Como en el caso de las pruebas lineales, en las circulares también se va ir incrementando su velocidad hasta su velocidad máxima, la cual fue ya preestablecida; dependiendo el tamaño de las figuras la velocidad puede llegar a su velocidad máxima y terminar la trayectoria o puede terminar la trayectoria sin haber alcanzado la velocidad máxima.

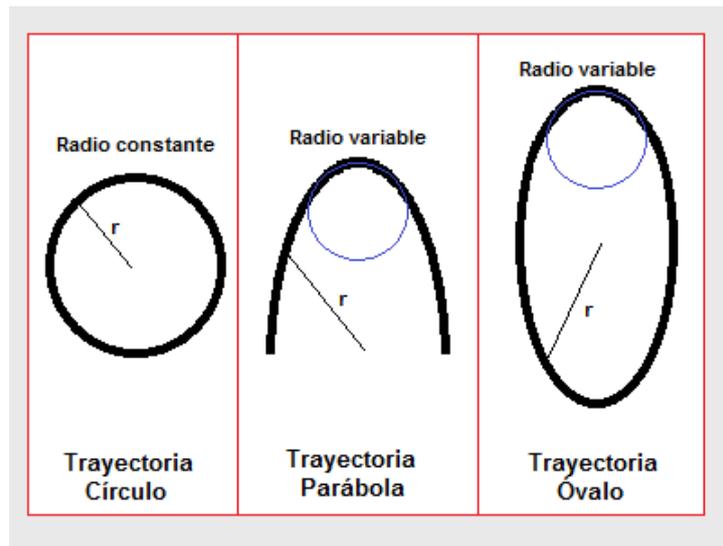


Figura 5.8: Trayectorias circulares.

En estos casos de trayectorias no lineales se tiene que, en el círculo la velocidad va ir incrementando y tratar de llegar a su velocidad máxima antes de terminar la trayectoria sin ningún problema, por así decirlo, ya que tiene un radio constante y no sufre cambios bruscos de dirección, mientras que en el caso de la parábola y el óvalo se tiene puntos críticos como son las cúspides, la velocidad se va ir incrementando hasta que el algoritmo de control se dé cuenta que está próximo a una variación notable de la trayectoria ya que tiene un radio variable, la velocidad se va a mantener o disminuir dependiendo como varíe el radio de giro, en la *figura* 5.8 se puede apreciar los radios de giro.

Tabla 5.4: Parámetros de trayectoria circular.

Trayectoria:	Círculo
Material:	Madera (trupan)
Velocidad de corte:	800 mm/min
Potencia del haz del láser:	85%

De igual forma que en el caso de la trayectoria lineal, se ha establecido los mismos parámetros para la trayectoria circular como se puede ver en la *tabla 5.4*, también se ha ejecutado el procedimiento correcto para poder realizar el corte láser de una trayectoria circular como se puede ver en la *figura 5.9*.

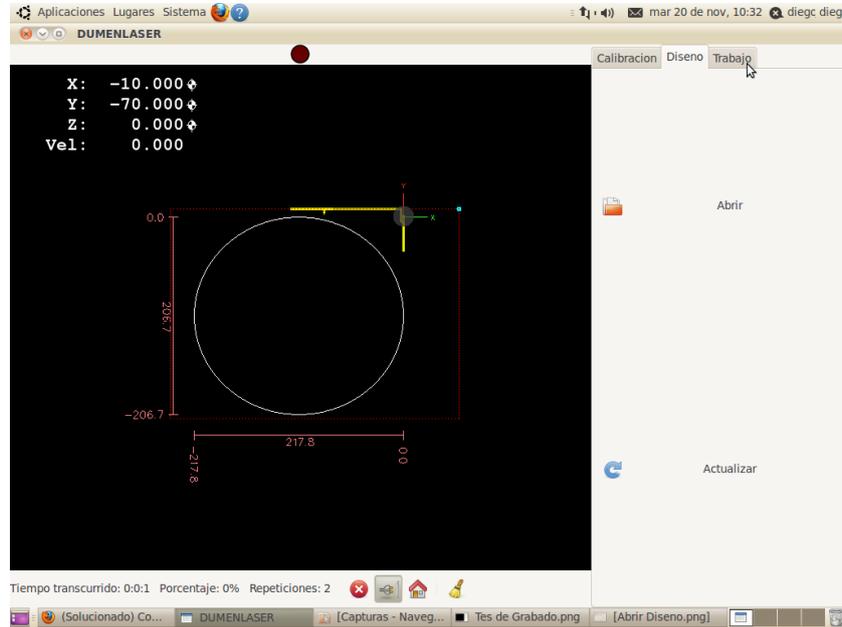


Figura 5.9: Trayectoria circular.

Tabla 5.5: Resultados de la ejecución de corte circular.

Trayectoria:	Circulo			
Material:	Madera (trupan)			
Repeticiones:	1	2	3	4
Porcentaje de trayectoria:	100%	100%	100%	100%
Repetitividad:	-	99.998%	99.998%	99.998%
Tiempo total de ejecución:	51.3 seg.	51.3 seg.	51.3 seg.	51.3 seg.

En la *tabla 5.5* se puede ver los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con la trayectoria circular, para ello se ha realizado 4 repeticiones cumpliendo el 100% de las trayectorias, con un promedio de repetitividad del 99.998% y un tiempo promedio de 51.3 segundos.

5.3 Desempeño del controlador con trayectorias combinadas lineales y circulares

Al no tener ningún inconveniente en las pruebas anteriores se ha combinado las trayectorias lineales y circulares, donde los cambios de velocidad van a ser más notables, por lo que se tendrán trayectorias lineales que formen ángulos agudos, rectos

y obtusos donde la velocidad tendrá que disminuir casi a cero dependiendo el ángulo, más las trayectorias circulares que es donde se puede apreciar de mejor manera la resolución de los motores, en la *figura 5.10* se puede ver una combinación de trayectorias.

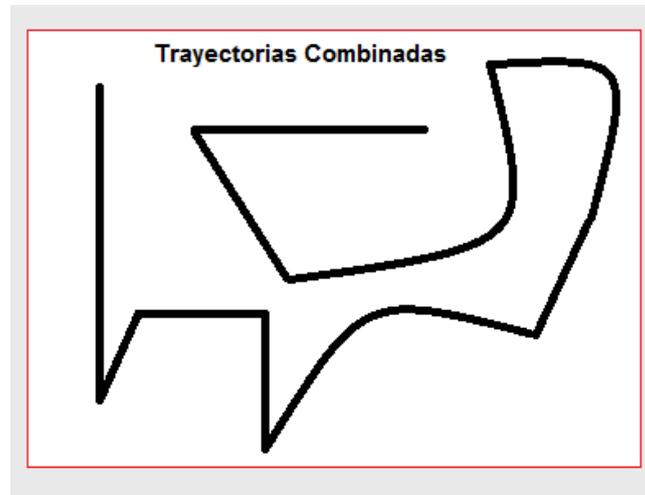


Figura 5.10: Ejemplo de trayectoria combinada.

La trayectoria expuesta en la *figura 5.11* de igual manera se dibujó en Corel Draw, una vez cargada en el sistema se debe verificar que la figura no sobrepase el área de trabajo con dimensión (19 cm en X, y 42 cm en Y). Como se ha venido indicando Corel Draw es el software que se ha utilizado para dibujar y establecer parámetros como, potencia del haz del láser y la velocidad de corte para cada una de las semi-trayectorias que conforma la trayectoria total.

En la *tabla 5.6* se puede ver los parámetros establecidos para cada una de las semi-trayectorias.

Tabla 5.6: Parámetros de trayectoria combinada.

Trayectoria:	Combinado
Material:	Madera (trupan)
Velocidad de corte:	800 mm/min
Potencia del haz del láser:	85%
Velocidad de corte:	800 mm/min
Potencia del haz del láser:	85%

En la *tabla 5.7* se puede ver los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con la trayectoria combinada, de igual forma que en los casos anteriores se ha realizado 4 repeticiones donde se ha cumplido el 100% de las trayectorias, con un promedio de repetitividad del 99.993% y un tiempo promedio de 65.012 segundos.

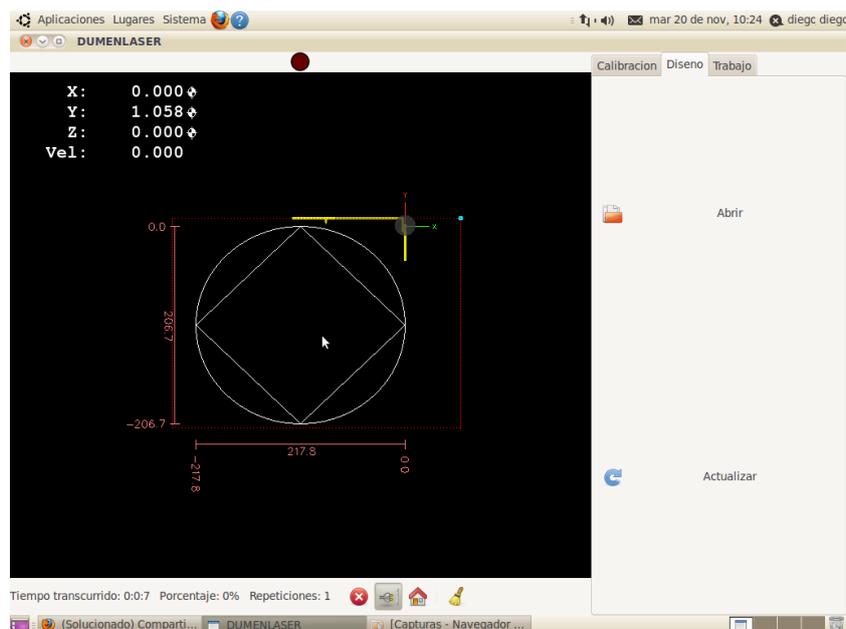


Figura 5.11: Trayectoria combinada.

Tabla 5.7: Resultados de la ejecución de corte combinado.

Trayectoria:	Combinada			
Material:	Madera (trupan)			
Repeticiones:	1	2	3	4
Porcentaje de trayectoria:	100%	100%	100%	100%
Repetitividad:	-	99.994%	99.995%	99.994%
Tiempo total de ejecución:	65.01 seg.	65.01 seg.	65.01 seg.	65.01 seg.

5.4 Desempeño del controlador en corte de texto

Para finalizar las pruebas de todo el sistema se ha visto conveniente ver el comportamiento en la generación de trayectorias formando letras ó caracteres, es decir realizar cortes de un texto sobre un determinado material.

Es importante tener en cuenta que este tipo de prueba va a determinar la precisión que tiene tanto el control de la máquina como el sistema mecánico de la CNC láser, ya que las letras a realizar para la prueba son de tamaño 12 lo cual necesita mayor precisión y exactitud, en la *figura 5.12* se puede ver el texto a cortar.

El diseño realizado esta conformado por texto y un borde el cual fue elaborado en el software de Corel Draw, una vez terminado dicho diseño se asigna un colores a las diferentes trayectorias y se ejecuta la opción de Láser Carve que se encuentra en la ventana de InterfacesICaditex (ver *figura 5.13* parte superior izquierda) la cual muestra una nueva venta de Parametrización Láser (ver *figura 5.13* parte central

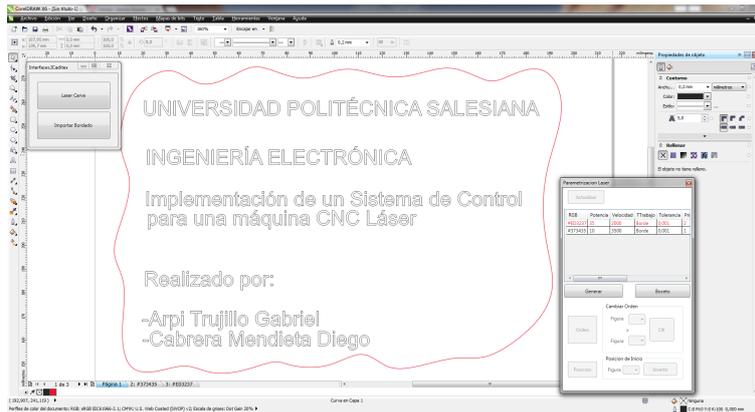


Figura 5.12: Diseño en Corel Draww.

derecha) donde se carga todas las capas con sus respectivos parámetros por defecto, para poder modificarlos se da doble click en la capa deseada y se abre una nueva ventana de Configuración de Parámetros (ver figura 5.13 centro de la figura), donde se tiene la opción de asignar la potencia del haz del láser, velocidad de corte, repetición de la trayectoria y la prioridad o turno de ejecución de corte, una vez terminado el diseño y configurado sus parámetros se guarda el archivo el cual está en código G.

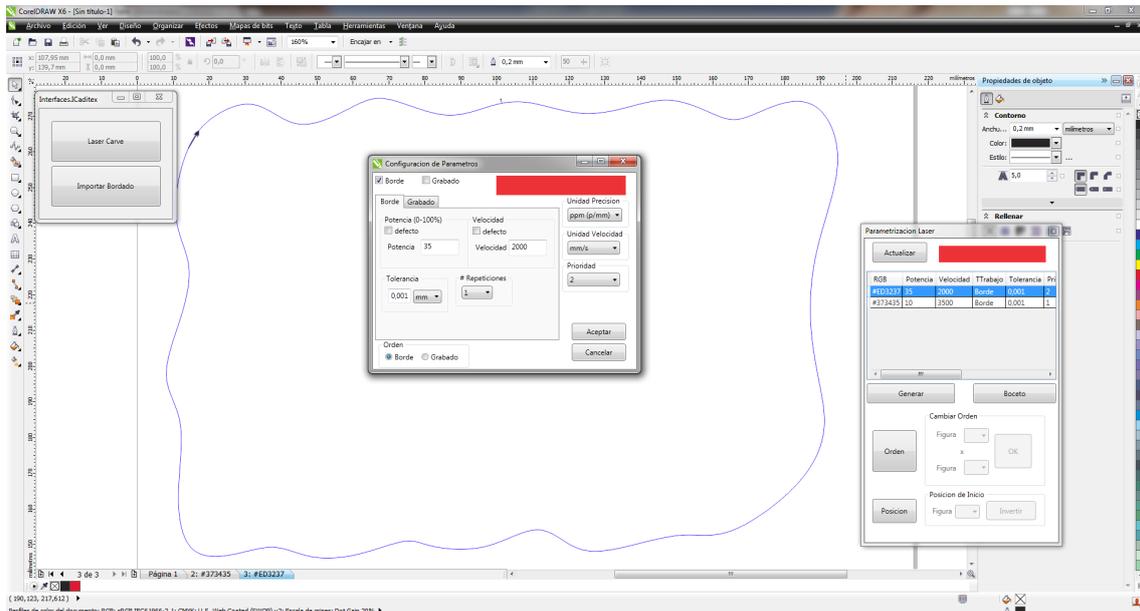


Figura 5.13: Parametrización de las trayectorias.

En el sistema CNC láser se realiza el procedimiento de encendido y se carga el diseño que se encuentra en código G como se puede ver en la figura 5.14, es indispensable que el diseño se encuentre dentro del área de trabajo para poder ejecutar los cortes. Como se puede ver en la figura 5.12 en esta prueba se utiliza dos capas con distintos parámetros como se puede ver en la tabla 5.8.



Figura 5.14: Prueba de corte de texto.

Tabla 5.8: Parámetros de corte en papel bond.

Trayectoria 1:	Texto	Trayectoria 2:	Borde
Material a cortar:	Papel	Material a cortar:	Papel
Color de Capa:	Plomo	Color de Capa:	Rojo
Potencia láser:	35%	Potencia láser:	10%
Velocidad de corte:	3500mm/min	Velocidad de corte:	2000 mm/min

La prueba se ha realizado en una hoja de papel ya que se puede apreciar de mejor manera la precisión de los cortes y verificar si la configuración de la potencia del láser y sus velocidades están bien calibradas para cada una de las capas utilizadas en el diseño.

En la *tabla 5.9* se puede ver los resultados obtenidos del corte, a diferencia de las pruebas realizadas anteriormente en este diseño no se ha realizado repeticiones de la trayectoria, por el motivo de verificar la calibración de los parámetros y lo más importante ver cómo está el enfoque de la boquilla del láser, siendo el enfoque un parámetro mecánico muy importante de calibración al momento de instalar el láser.

Tabla 5.9: Resultados del corte de texto.

Trayectoria:	Texto - Borde
Material a cortar:	Papel
Repetición:	1
Porcentaje de trayectoria:	100%
Tiempo total de corte:	137 seg.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

Un Sistema operativo Linux modificado su kernel mediante RTAI presenta características de determinismo y la factibilidad de realizar procesos en tiempo real lo cual garantiza que el sistema puede funcionar sin interrupción de otros procesos como son recepción de paquetes mediante el protocolo TCP/IP vía Ethernet, lectura de puerto USB, Captura y reproducción de video, etc. Sin afectar la generación de trayectorias con sus respectivos perfiles de velocidad, siendo este un proceso de sistema operativo con la más alta prioridad que se le puede asignar.

La implementación del algoritmo de lookahead, perfiles de velocidad y generación de trayectorias como componentes de tiempo real para el kernel RTAI de Linux solamente es factible programarlos en lenguaje C por la necesidad de optimización de tiempo de procesamiento, velocidad de cálculo en punto flotante y predictibilidad del proceso.

El algoritmo de lookahead permite controlar la cantidad de eventos de aceleración y desaceleración presentes en la realización de un diseño disminuyendo estos al observar el o los movimientos posteriores para así frenar la máquina solamente cuando es necesario. Reduciendo de manera indirecta la cantidad de jerks (sacudones) presentes en la realización de la trayectoria.

La curva de velocidad vs torque de los motores de pasos mostrada por el fabricante, da una pauta inicial al diseñador del sistema tanto de control como mecánico para escoger de una manera sencilla el actuador correcto para la aplicación. Para ello es necesario conocer las inercias producidas por las masas al momento de efectuar el movimiento, la aceleración y desaceleración con la cual se desea realizar el movimiento, la velocidad máxima a la cual podría moverse la herramienta. Al profundizar en el tema de masas inerciales es necesario realizar un desglose de las mismas teniendo en consideración como principales la masa del puente del eje x junto

con la herramienta al ser lo más pesado en el sistema. No obstante no se debe dejar de lado inercias más pequeñas como son las que componen el eje de transmisión, las poleas en el sistema de reducción e incluso la masa propia del eje del motor que individualmente no representan un incremento mayor en la inercia general pero en conjunto pueden afectar el rendimiento del sistema al tener que hacerlo funcionar a velocidades o aceleraciones menores para compensar el torque faltante en el motor. Dicho cálculo de inercias y torque es realizado por el ingeniero mecánico de planta en la empresa Caditex.

El cálculo cinemático del robot cartesiano es sencillo en relación al mismo efectuado en otros tipos de configuraciones robóticas. Esto se debe gracias al desacoplo que tienen sus articulaciones entre sí, permitiendo de esta manera realizar un cálculo independiente en el que solamente se incluyen las variables presentes en cada una de las articulaciones.

El sistema de control implementado, puede ser fácilmente migrado a otras plantas a controlar permitiendo así una flexibilidad al momento de desarrollar nuevas tecnologías como son:

- Sistemas de corte por plasma.
- Sistemas de Oxicorte.
- Sistemas de Corte Laser para metal.
- Impresoras 3D.
- Sistemas de Bordado.

Siendo todas estas aplicaciones derivadas del robot cartesiano y totalmente factibles de implementar con el control realizado.

La utilización de software libre para el desarrollo de controladores es de vital importancia a la hora de obtener un producto terminado para el mercado actual como por ejemplo:

- Reduce drásticamente los costos de desarrollo.
- Evita problemas con leyes nacionales e internaciones respecto a plagio.

- El soporte vía internet permite tener un equipo de colaboradores completo y dispuesto a ayudar.
- Permite totalmente comercializar un producto al no vender el software como tal. En vez de ello se comercializa la máquina completa.

Si por el contrario al usar software libre se creía en tiempos pasados que no se obtiene la misma calidad que con un software comercial, esta afirmación al paso de los años se ha convertido en un mito al lograr interfaces excelentes y fáciles de manejar. En concreto con esta aplicación el desarrollo de una interface humano máquina en lenguaje de programación python en conjunto con xml ha permitido obtener excelentes resultados en cuanto a su uso y presentación al usuario final, pasando de tener como medio de interface un panel monocromático basado en caracteres alfanuméricos, a una interface totalmente gráfica con presentación de trayectorias y diseñada para una implementación con un panel touch screen.

La calibración del sistema óptico de un sistema CNC Laser es uno de los puntos fundamentales a la hora de empezar las pruebas y calibraciones con la herramienta de corte. Es necesario tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Tener puesto el equipo protector: guantes, mandil de asbesto, gafas protectoras con filtro para laser, mascarilla antigases.
- Mantenerse fuera del alcance del haz láser (no ubicarse en la ruta de disparo y reflexión).
- Colocar en frente de los espejos no calibrados material no reflectivo para evitar la reflexión a puntos aleatorios de la zona de calibración.
- No mirar el haz de laser de manera directa.
- Aislar una zona para la calibración de los lentes.

Es por esta razón que en el presente trabajo se realizó inicialmente un prototipo inicial para el desarrollo y pruebas del sistema de movimiento y luego se realizó la implementación en un sistema mecánico diseñado y construido por Caditex con las seguridades respectivas para evitar daños al momento de interactuar con la radiación láser.

Al momento de realizar la calibración de los espejos es necesario contar con personal capacitado en el tema.

La calibración se la realiza comenzando desde la lámpara láser y terminando en la boquilla.

Se alinea la lámpara de tal manera que el haz pegue en el centro del primer espejo reflector, para ello se usa cinta masking colocada en frente del espejo para visualizar de esta manera el punto donde el haz está disparando y hacer las correcciones necesarias.

Habiendo alineado la lámpara se coloca material no reflectivo en frente del primer espejo para visualizar el ángulo de disparo al que está saliendo el haz. Se realizan las correcciones necesarias para que el haz pegue en el centro del segundo espejo.

Se realiza un proceso similar para que el haz pegue en el centro del espejo ubicado en la parte superior del cabezal láser.

Se realiza el enfoque necesario en el cabezal láser para obtener un buen corte en el material.

Cabe recalcar que es necesario verificar que el haz pegue en el mismo punto de los espejos en toda el área de trabajo para tener los mismos resultados en todo el material.

Al tener que realizar la importación de ciertos componentes para el desarrollo del sistema es necesario considerar los tiempos que estos conllevan para evitar retrasos al momento de disponer de los mismos.

En el mercado nacional existen ciertas compañías que venden partes necesarias para la elaboración de un sistema CNC Láser, pero lamentablemente los costos elevados a los cuales estos productos son comercializados obligan a la empresa de desarrollo a importar los componentes, lo cual principalmente influye en problemas de retrasos por procesos de desaduanización y pérdidas.

Las máquinas CNC láser se caracterizan por ser sistemas de lazo abierto, es decir no tiene retroalimentación que les pueda indicar la pérdida de pasos en la generación de las trayectorias, por lo que es necesario que el sistema sea totalmente confiable comenzando desde el algoritmo de generación de trayectorias, la parametrización de

las señales, el transmisión de la información a los actuadores y sin dejar de lado la construcción mecánica del manipulador.

Básicamente el funcionamiento de toda la planta está conformado por una PC1 con sistema operativo Windows donde se maneja el software de Corel Draw para la generación del código G, se tiene una PC2 con sistema operativo Linux donde se interpreta del código G, la PC2 está conectada en red con la PC1 mediante el protocolo TCP/IP, también se tiene la opción de utilizar el protocolo USB. En la PC2 se realiza todo el cálculo para la generación de las trayectorias con sus perfiles de velocidad y potencia láser, y se comunica con el manipulador mediante el protocolo de bus PCI. El manipulado recibe la información en forma de pulsos en los drives de los actuadores (motores eje XY y fuente láser) para realizar los movimientos deseados ver la *figura 6.1*.

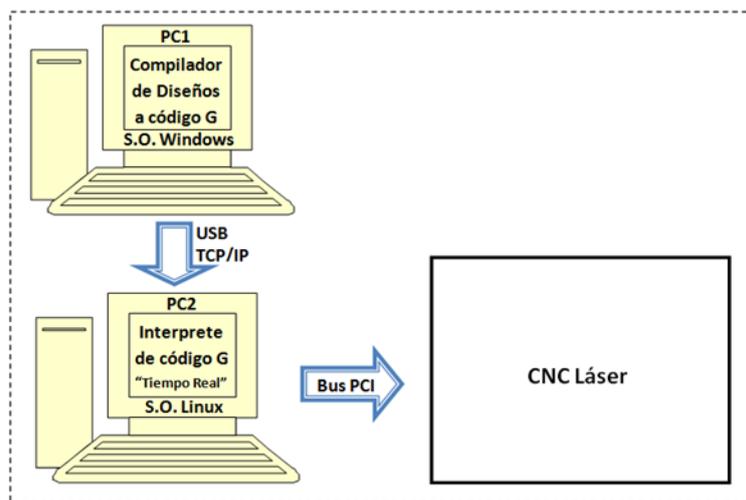


Figura 6.1: Estructura de la aplicación.

Se debe tener en cuenta que el tema de trabajo realizado es (Implementación de un Sistema de Control para una Máquina CNC Láser) sin embargo es muy importante el compilador de código G, lo cual se ha visto que corel draw tiene una interfaz humano-máquina muy amigable para el usuario y tiene versiones para los diferentes sistemas operativos, como la gran cantidad de usuarios prefiere trabajar en Windows se ha optado modificar el software corel draw para Windows, creando una ventana con las diferentes opciones de parametrización de los diseño como son velocidad del movimiento de la herramienta y la potencia del haz de corte entre otros. Toda la información obtenida para poder entrar a la base de datos del software y modificarle se obtuvo en foros de comunidades virtuales, de donde se obtuvo también toda la ayuda necesaria para programar los comandos como son, selección de objetos para asignar la capa de trabajo, cada capa de trabajo tiene la opción de ser modificada su

velocidad, potencia de corte, número de repetición, prioridad de corte entre otros.

El software utilizado para el diseño de la interfaz humano-máquina del sistema de la planta CNC láser es Python, el lenguaje de programación de python es un lenguaje interpretado lo que quiere decir que necesita un programa intermediario (interprete) que en este caso es el control del sistema realizado en RTAI. En la *figura 6.2* se puede ver un diagrama de flujo de cómo es el proceso entre la interfaz y el interprete para enviar la información al manipulador.

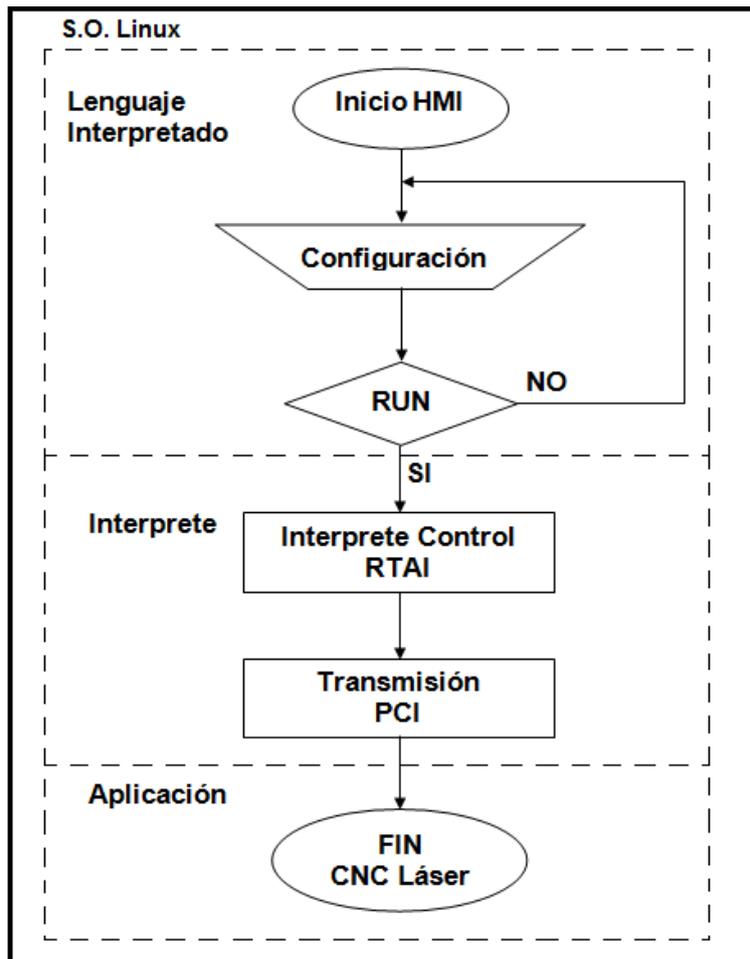


Figura 6.2: Diagrama de flujo de la HMI

ANEXOS

Diseño Estructura

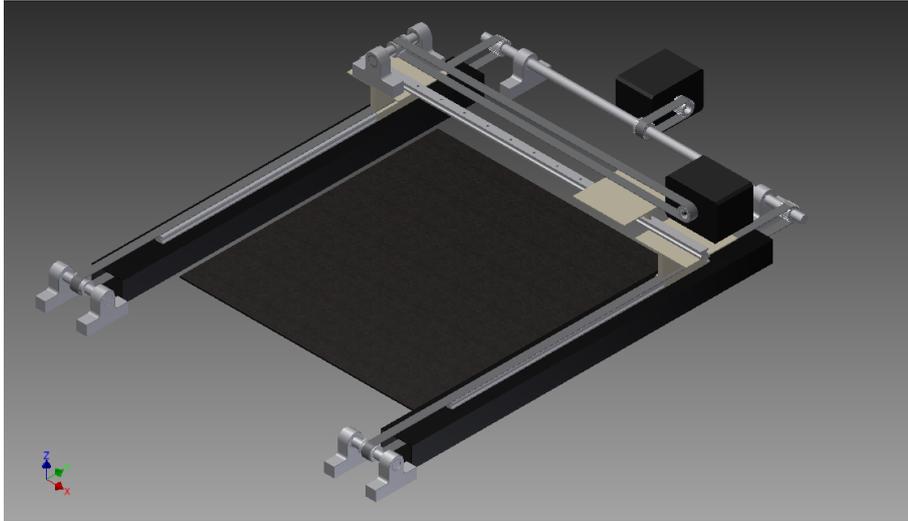


Figura 3: Diseño pantógrafo.

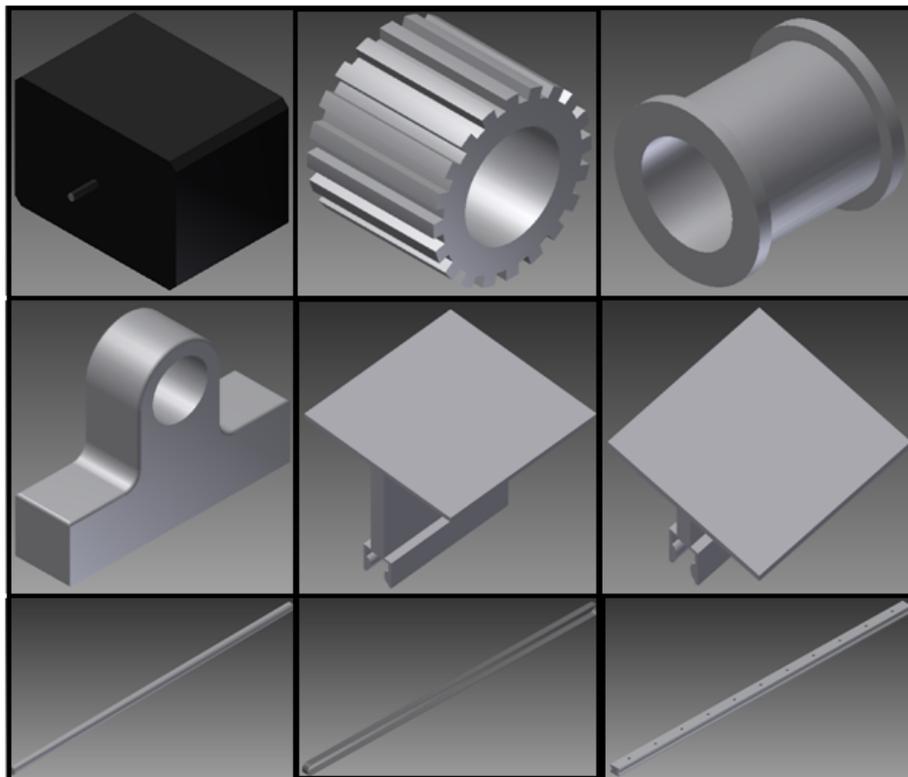


Figura 4: Componentes principales.

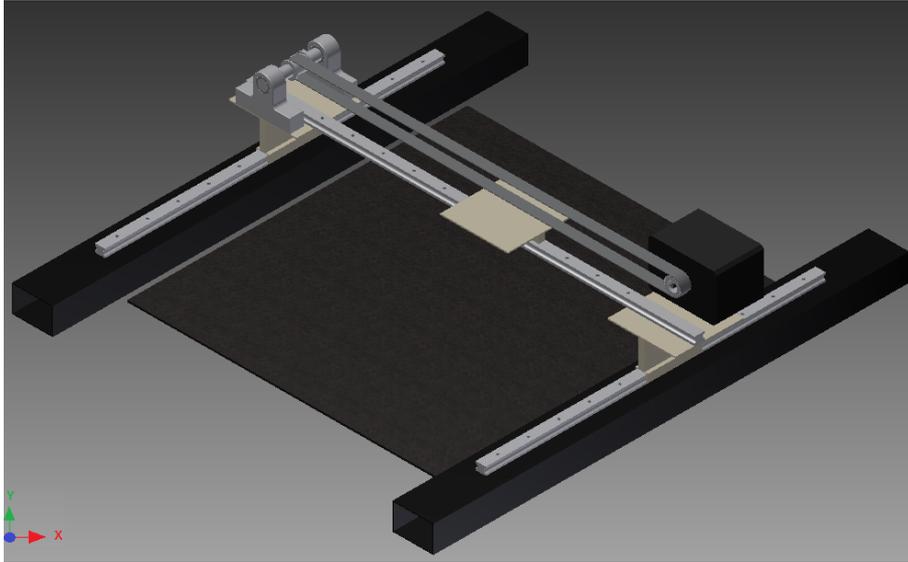


Figura 5: Transmisión eje X.

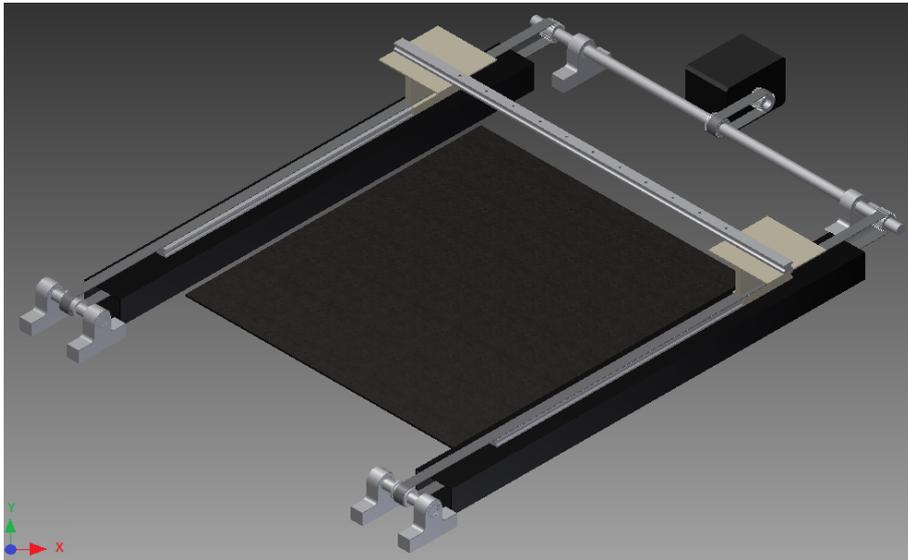


Figura 6: Transmisión eje Y.

Estructura CNC láser y componentes

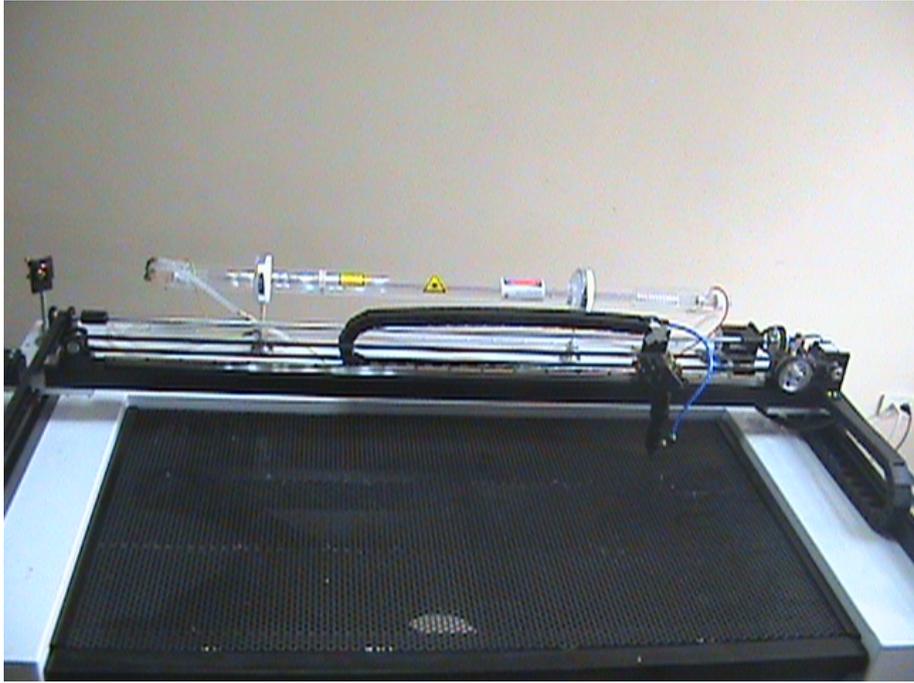


Figura 7: CNC Láser.

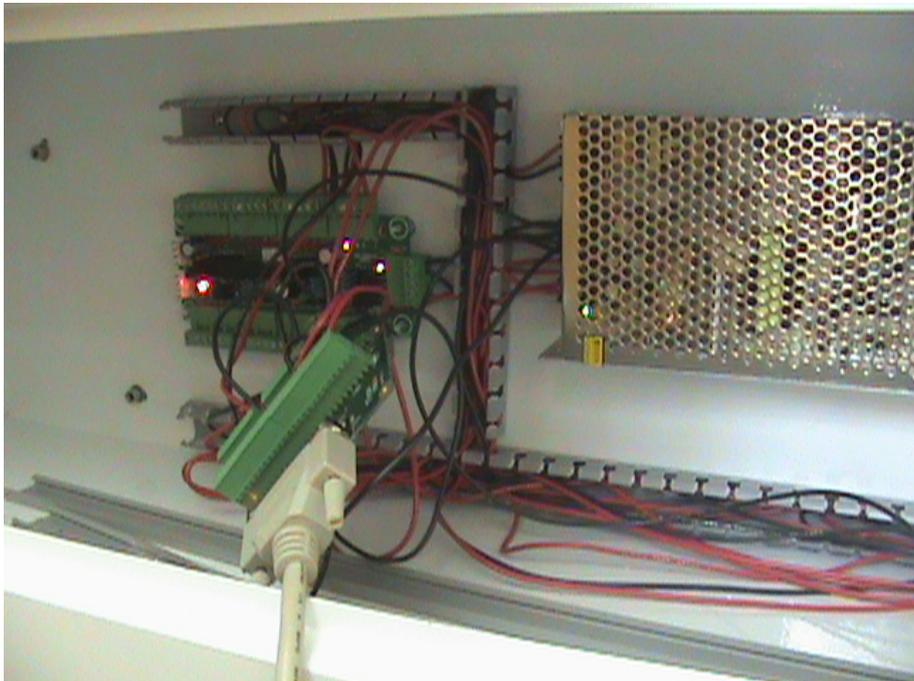


Figura 8: Tarjeta de expansión.

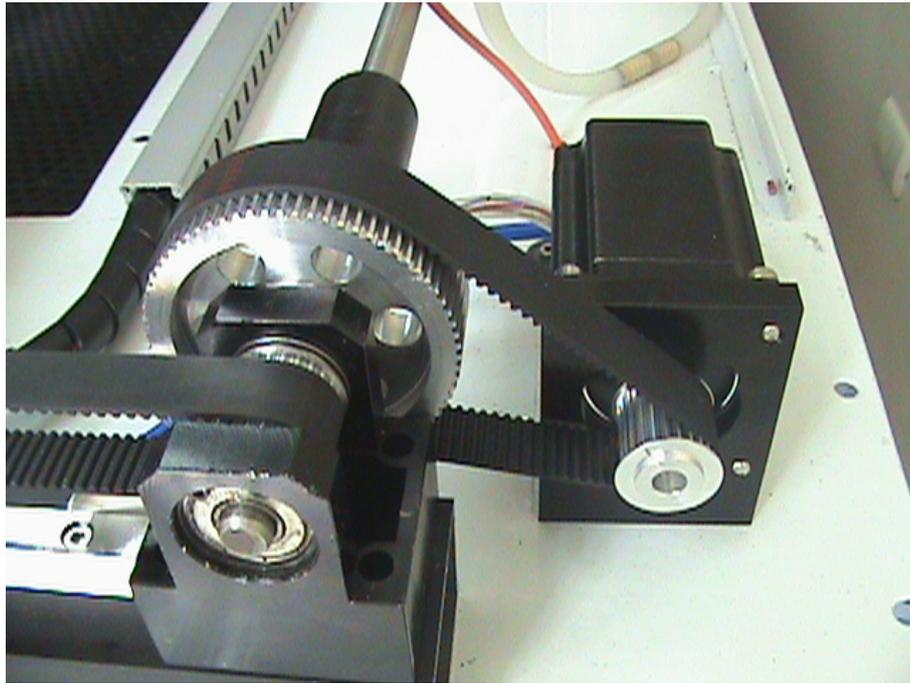


Figura 9: Motor del eje X, con su transmisión de engranes 3:1

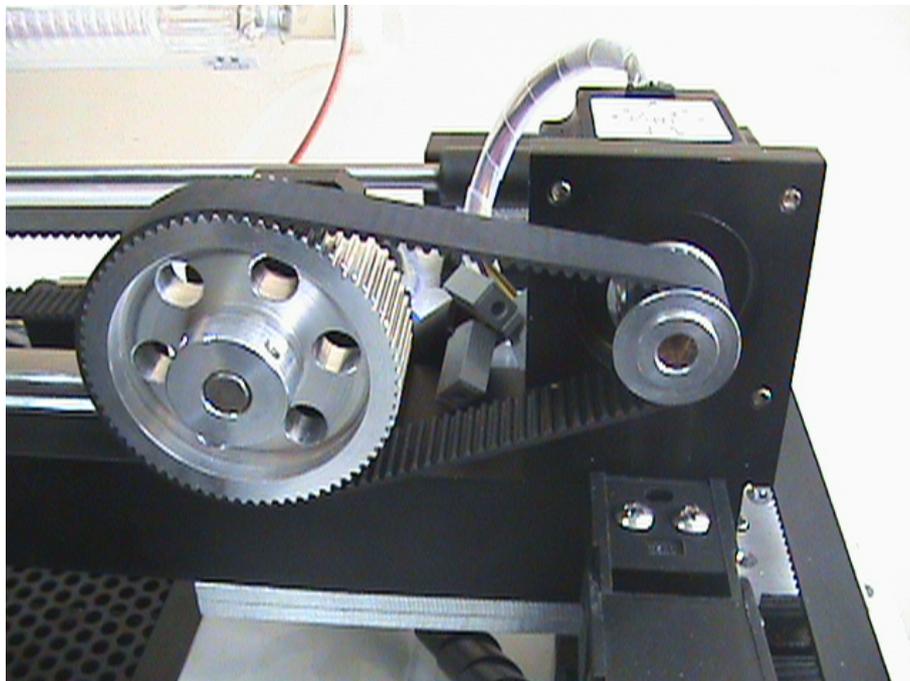


Figura 10: Motor del eje Y, con su transmisión de engranes 3:1

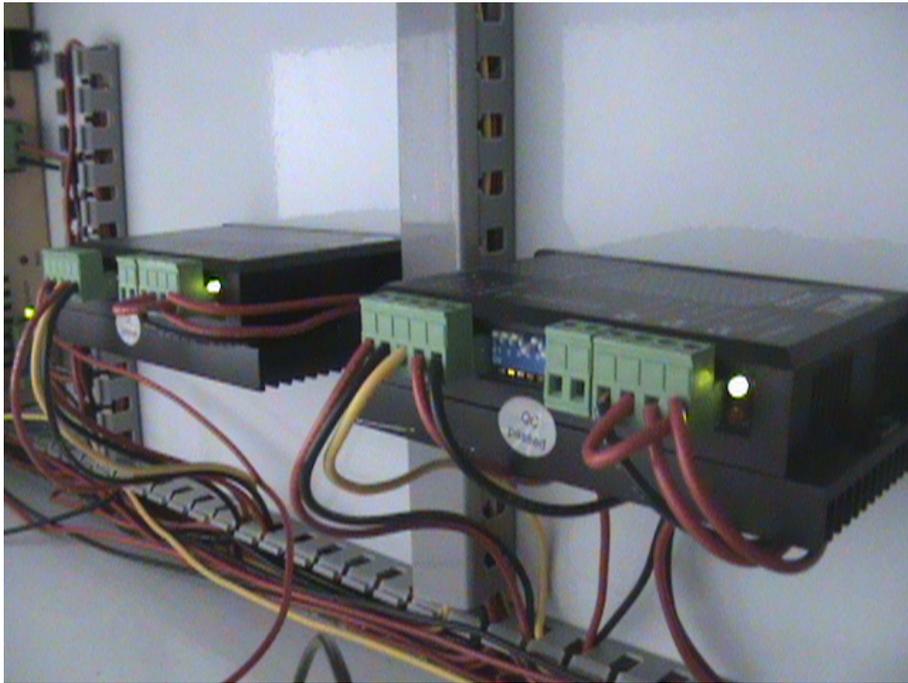


Figura 11: Drivers motores ejes XY.



Figura 12: Fuente láser.

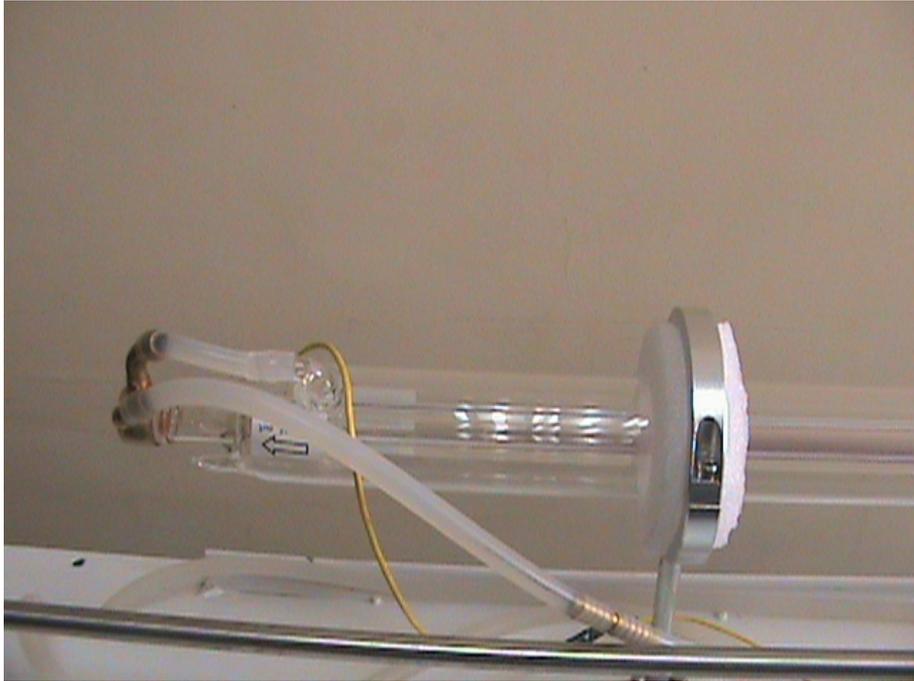


Figura 13: Lámpara láser.

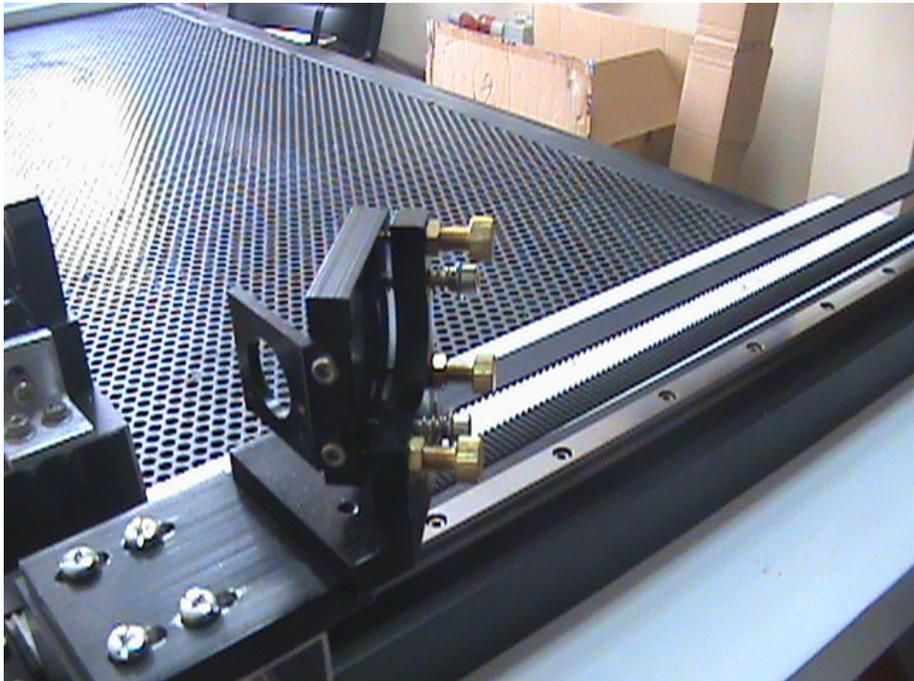


Figura 14: Espejos para el haz del láser.

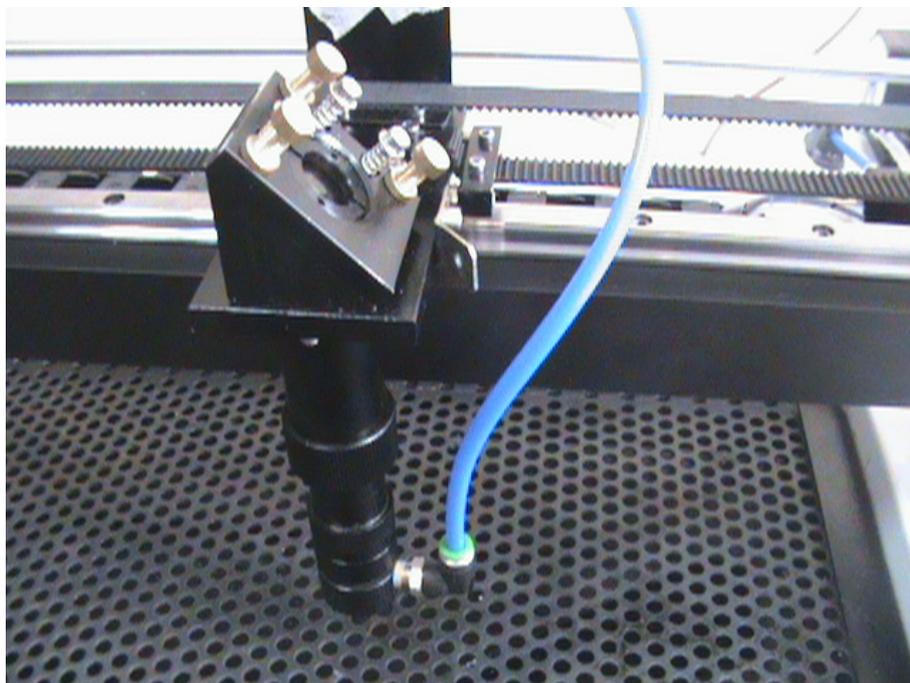


Figura 15: Boquilla láser.

Prueba de cortes

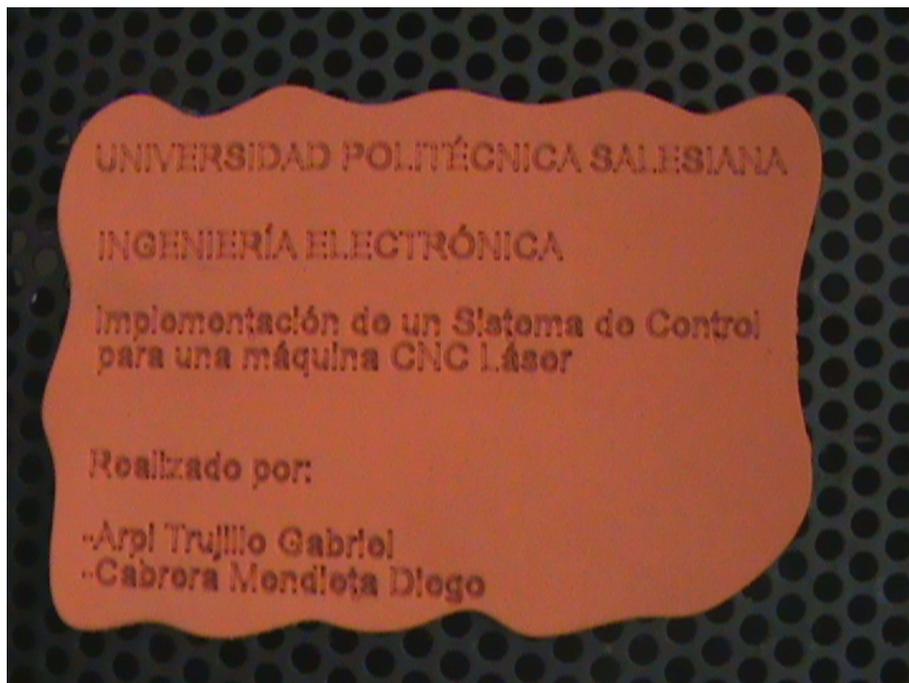


Figura 16: Corte láser en Fomix.

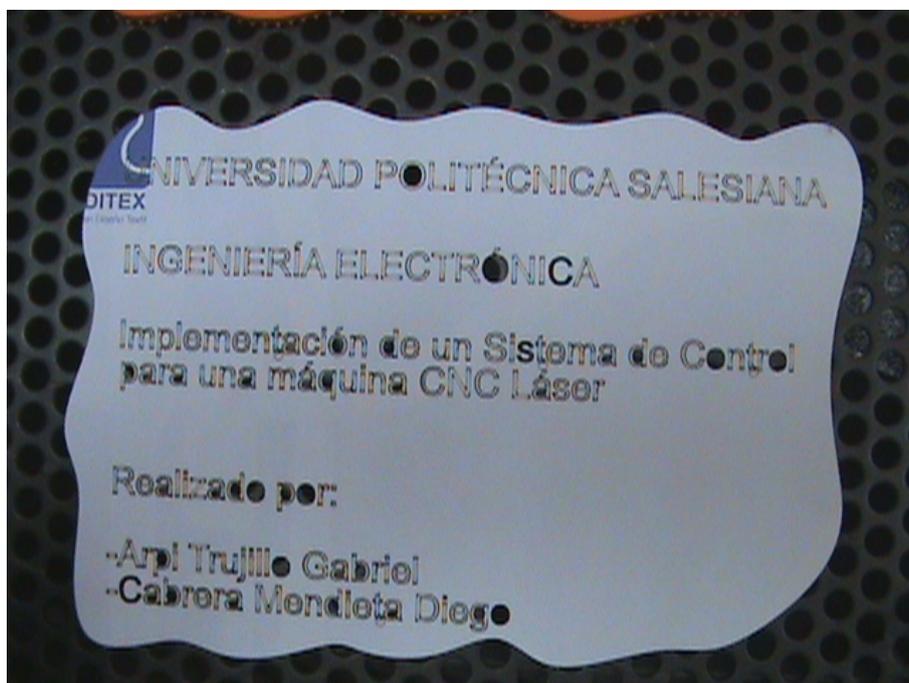


Figura 17: Corte láser en Papel.



Figura 18: Corte láser en Trupan.



Figura 19: Corte de una matriz de 2x2 en trupan.

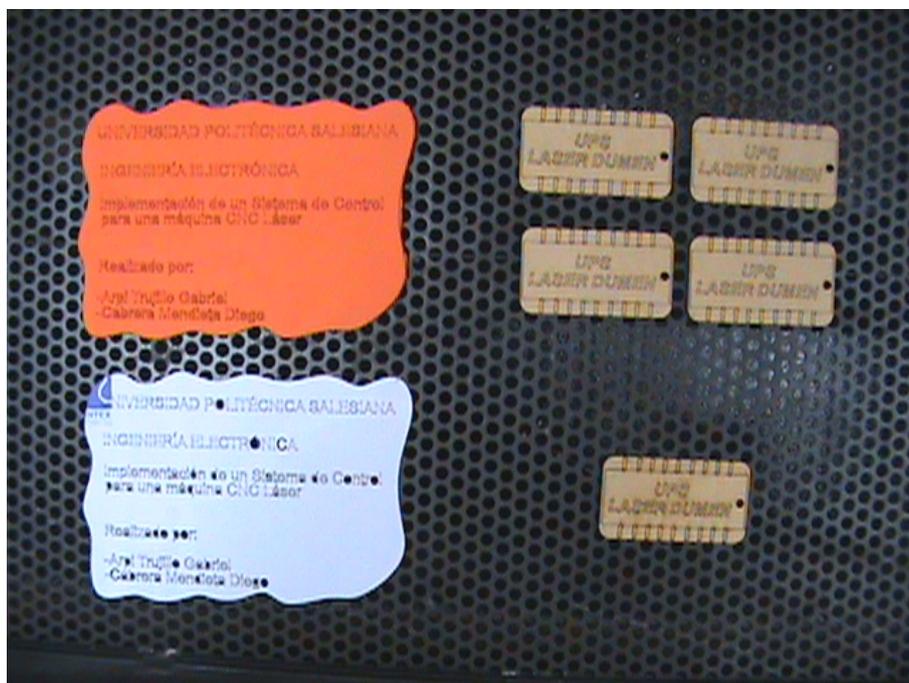


Figura 20: Cortes en los diferentes materiales.

Presupuesto

Los gastos realizados para el desarrollo de la IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA MÁQUINA CNC LÁSER se presente en la siguiente *tabla*. En cuanto a los gastos realizados para el diseño y construcción de la estructura mecánica es información restringida por la empresa caditex, que es la empresa que está financiando todos los gastos.

Descripción	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Motores gecko	\$ 59,00	2	\$ 118,00
Intel Atom D525MW	\$ 79,00	1	\$ 79,00
Disco Duro de Estado Sólido Talent 8Gb	\$ 50,00	1	\$ 50,00
Ram 2Gb	\$ 18,00	1	\$ 18,00
Monitor 7" Touch	\$ 150,00	1	\$ 150,00
Teclado	\$ 20,00	1	\$ 20,00
Mouse	\$ 12,00	1	\$ 12,00
PC Intel Core 2 Duo	\$ 300,00	1	\$ 300,00
Motores tamagawa	\$ 89,00	2	\$ 178,00
Motor Vexta	\$ 180,00	1	\$ 180,00
Driver IST 301	\$ 80,00	2	\$ 160,00
Tubo Laser	\$ 800,00	1	\$ 800,00
Fuente Laser	\$ 3000,00	1	\$ 300,00
Juego de Lentes	\$ 200,00	1	\$ 200,00
Boquilla	\$ 200,00	1	\$ 200,00
Cables	\$ 5,00	1	\$ 5,00
Conectores	\$ 5,00	1	\$ 5,00
Licencias de Corel Draw X6	\$ 199,00	1	\$ 199,00
Costos de Ingenieria	\$ 2.000,00	10	\$ 20.000,00
Gastos Extras	\$ 400,00	1	\$ 400,00
Total			\$ 23.514,00

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Samper Martínez Daniel. *Diseño y construcción de una máquina de control numérico con control en tiempo real mediante dispositivo apuntador*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, septiembre 2011.
- [2] Barrera López de Turiso Eduardo. *Arquitectura PXI multiprocesadora para adquisición y procesado de datos en tiempo real aplicación a diagnósticos en entornos de fusión por confinamiento magnético*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2008.
- [3] Badínez Lara Rodrigo Orlando. *Diseño y simulación y simulación de un instrumento para la estimación de torque de un motor paso a paso*. Universidad de Chile, Santiago, Chile, junio 2007.
- [4] Barrientos Antonio; Peñin Luis Felipe; Balaguer Carlos; Aracil Rafael. *Fundamentos de robótica*. 1997.
- [5] Kramer T. R.; Proctor F. M; Messina E. The nist rs274/ngc interpreter-version 3.
- [6] Bohlin R.; Kavraki L.E. Path planning using lazy prm. In *Proc. ICRA '00. IEEE International Conference on*, pages 521 – 528 vol.1, San Francisco, CA, April 2000.
- [7] Biagiotti Melchiorri C. *Trajectory planning for automatic machines and robots*. 2008.
- [8] Jordi Mayné. Sistemas de comunicaciones.
- [9] Departamento de Arquitectura y tecnología de Computadores. Descripción bus pci, conexión externa de procesadores. 2009.
- [10] Román Asenjo Enrique Efraín. *Implementación de interfaz PCI sobre plataforma industrial basada en dispositivo FPGA*. Universidad de Chile, Santiago, Chile, abril 2009.

- [11] Sáez Rodríguez Manuel. *Aplicación de la transferencia DMA al desarrollo de una plataforma reconfigurable para procesamiento de imágenes*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2008.
- [12] Ruiz Herrera Gilberto. *Diseño y construcción de un control numérico de arquitectura abierta*. Universidad Politécnica Salesiana, México, México, septiembre 2007.
- [13] Echeverría Luis; Salazar Juan Carlos; Gortaire Alfonso Vladimir. *Diseño y simulación de una mini fresadora didáctica controlada por PC*. Escuela Politécnica del Ejercito, Sangolqui, Ecuador, septiembre 2010.
- [14] Quimbita Quimbita Javier Medardo; Sanchez Barrionuevo Raul Ernesto. *Diseño y Construcción de un Router CNC para la Fabricación de Puertas MDF*. Escuela Politécnica del Ejercito, Latacunga, Ecuador, diciembre 2008.
- [15] Conti Francisco. *Motores paso a paso*.
- [16] Martinez Kraemer D; Paredes A; Maceira G. El proceso de corte láser aplicado a la manufactura de probetas planas de tracción normalizadas obtenidas a partir de chapas finas de acero galvanizado. 2002.
- [17] Tanenbaum Andrew S. *Sistemas operativos modernos*. 2003.
- [18] Torres Camilo E; Bernal Alvaro; Nieto R. Diseño e implementación de una tarjeta pci basada en una fpga.
- [19] Rogina Pablo J. *Tolerancia a Fallas en Sistemas de Tiempo Real*. Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina, diciembre 1999.
- [20] Peralta Dolz Jordi. *Tiempo Real en el Núcleo de Linux*. Universitaria de Barcelona, Barcelona, España, febrero 2009.
- [21] Bilmes Gabriel M. *Láser*. 1992.
- [22] Calvo José Rupérez. Ntp 261: Láseres, riesgos en su utilización.
- [23] Moya Pinta Diego Armando. *Modelo y Análisis Cinemático de un Robot manipulador esférico industrial aplicando MatLab*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, agosto 2010.
- [24] Torvalds Linus. The linux edge.
- [25] Dozio Lorenzo; Mantegazza Paolo. Linux real time application interface (rtai) in low cost high performance motion control.

- [26] Cloutier P.; Mantegazza Paolo; Papacharalambous S.; Soanes I.; Hughes S.; Yaghmour K. Diapm-rtai position paper, nov 2000.
- [27] J.J. Kuffner Jr; S.M. LaValle. Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning. In *Proc. ICRA'00. IEEE International Conference on RRT-connect*, pages 995 – 1001 vol.2, San Francisco, CA, April 2000.
- [28] LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning.
- [29] Visser M. Jerk, snap and the cosmological equation of state. 21:2603, 2004.
- [30] Viviani P; Flash T. Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. 21:32, 1995.
- [31] Dutari Dutari Raúl Enrique. *La guerra de los buses*. Centro Regional Universitario de Veraguas, Veraguas, Panamá, abril 2009.