

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### DISEÑO DE UNA CORTADORA LÁSER CNC DE CO<sub>2</sub> PARA ACRÍLICOS Y MADERA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:

**Alonso Ricardo Pérez Espinoza**

**ASESOR: Miguel Ángel Cataño Sánchez**

**Lima, octubre del 2015**

## RESUMEN

Una de las necesidades con mayor demanda por parte de la sociedad (el hogar estándar), estudiantes universitarios y los pequeños negocios, es la precisión en el corte de madera y acrílicos. En el caso del hogar estándar, existe una necesidad por realizar proyectos de carpintería, manualidades o quizás simplemente para entretenimiento y desarrollo de habilidades creativas de los niños. En el caso de los estudiantes universitarios, los estudiantes de Arquitectura y Diseño Industrial requieren elaborar maquetas de alta precisión y hacer uso eficiente de su tiempo para elaborar estas, sin perder tiempo en el corte manual. En el caso de los estudiantes de ingeniería es la elaboración de maquetas para probar conceptos de solución a un posible problema de diseño que se les presente. Por otro lado, los negocios de venta de materiales de carpintería y hogar también exigen el corte personalizado y de alta calidad superficial, por la variedad de aplicaciones y diseños estéticos que hoy en día circulan.

El presente proyecto de tesis tiene por objeto atender esta necesidad puntual de una gran variedad de potenciales usuarios finales, así como responder a la solicitud de los expertos en el tema. Se diseñará una cortadora láser CNC para el corte de madera y acrílicos.

En cuanto a los objetivos, el principal, es diseñar una cortadora láser CNC de bajo costo, de tal manera que sea asequible para los potenciales usuarios anteriormente mencionados. En cuanto a los objetivos secundarios, se tiene la selección del sistema óptico a utilizarse y del láser, determinar la potencia requerida y velocidad de corte. En cuanto a la electrónica y el control, se seleccionará los sensores y actuadores, se diseñará los circuitos para el control de estos y el procesamiento de los datos de entrada que especifique el usuario (diseño a cortar) y se diseñará la lógica de control en un flujograma. En cuanto a la mecánica, se tiene el diseño de un sistema de movimiento en el plano XY, para ello se plantea los posibles elementos que lo integrarán, se calcula los esfuerzos y momentos a los cuales estarán sometidos, con ello se dimensiona y se elige materiales.

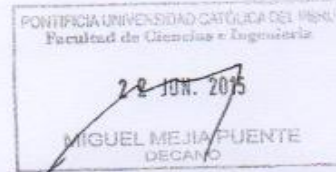
FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR  
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Diseño de una Cortadora Láser CNC de CO<sub>2</sub> para Acrílicos y Madera  
 Asesor : Cataño Sánchez, Miguel Ángel  
 Alumno : Pérez Espinoza, Alonso Ricardo  
 Código : 20100665  
 Tema N° : 97  
 Fecha : 03/06/2015 - 3 de Junio del 2015



**Descripción y Objetivos**

Una de las necesidades con mayor demanda por parte de la sociedad (el hogar estándar), estudiantes universitarios y los pequeños negocios, es la precisión en el corte de madera y acrílicos. En el caso del hogar estándar, existe una necesidad por realizar proyectos de carpintería, manualidades o quizás simplemente para entretenimiento y desarrollo de habilidades creativas de los niños. En el caso de los estudiantes universitarios, los estudiantes de Arquitectura y Diseño Industrial requieren elaborar maquetas de alta precisión y hacer uso eficiente de su tiempo para elaborar estas, sin perder tiempo en el corte manual. En el caso de los estudiantes de ingeniería es la elaboración de maquetas para probar conceptos de solución a un posible problema de diseño que se les presente. Por otro lado, los negocios de venta de materiales de carpintería y hogar también exigen el corte personalizado y de alta calidad superficial, por la variedad de aplicaciones y diseños estéticos que hoy en día circulan.

El presente proyecto de tesis tiene por objeto atender esta necesidad puntual de una gran variedad de potenciales usuarios finales, así como responder a la solicitud de los expertos en el tema. Se diseñará una cortadora láser CNC para el corte de madera y acrílicos.

En cuanto a los objetivos, el principal, es diseñar una cortadora láser CNC de bajo costo, de tal manera que sea asequible para los potenciales usuarios anteriormente mencionados. En cuanto a los objetivos secundarios, se tiene la selección del sistema óptico a utilizarse y del láser, determinar la potencia requerida y velocidad de corte. En cuanto a la electrónica y el control, se seleccionará los sensores y actuadores, se diseñará los circuitos para el control de estos y el procesamiento de los datos de entrada que especifique el usuario (diseño a cortar) y se diseñará la lógica de control en un flujograma. En cuanto a la mecánica, se tiene el diseño de un sistema de movimiento en el plano XY, para ello se plantea los posibles elementos que lo integrarán, se calcula los esfuerzos y momentos a los cuales estarán sometidos, con ello se dimensiona y se elige materiales.

MAXIMO: 100 páginas

*Emilia T. Madrid*



*[Signature]*

*[Signature]*





*El presente trabajo de tesis se lo dedico a Pedro Espinoza, mi abuelo que en paz descansa, que siempre me alentó en mis sueños y me enseñó lo que es el trabajo duro, a mi madre que siempre me apoyo y cuido de mí, a mi abuela Dorothy que cuido de mí desde pequeño hasta el día de hoy con un amor de madre, a mi hermano que me hizo sonreír cuando más lo necesitaba, a mis amigos por su apoyo y su tiempo invaluable, así como también a mis profesores por sus enseñanzas académicas y humanas.*



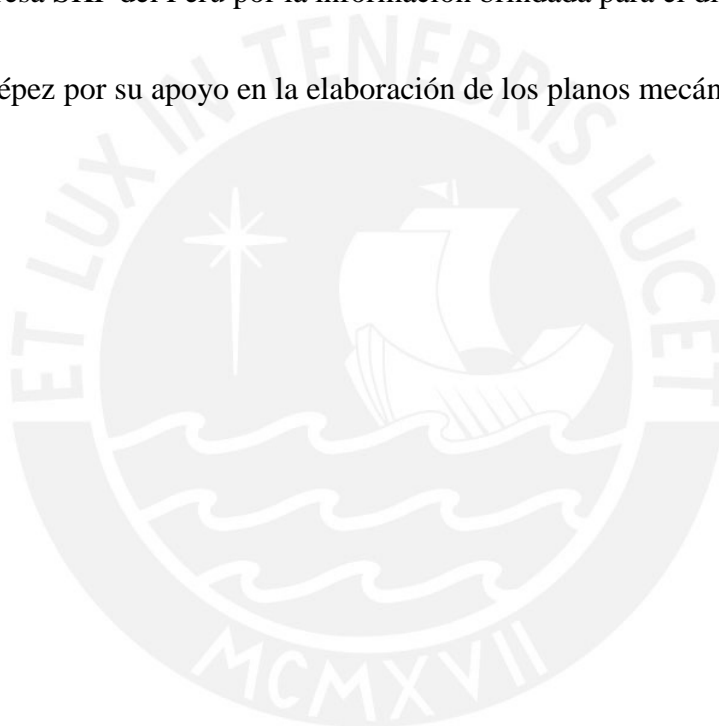
## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a mi asesor el M.Sc. Miguel Ángel Cataño Sánchez, por su apoyo académico, su extraordinaria disponibilidad para absolver mis dudas, la confianza puesta en mi persona y por sobretodo su visión para hacerme dar cuenta la necesidad existente del sistema mecatrónico diseñado y crear en mí una motivación.

Asimismo, agradecer a la Dra. Elizabeth Roxana Villota Cerna por su apoyo con la articulación del documento, su constante preocupación y tiempo brindado.

Agradecer a la empresa SKF del Perú por la información brindada para el diseño mecánico.

Al M.Sc. Herbert Yépez por su apoyo en la elaboración de los planos mecánicos y modelos CAD/CAE.



## INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problemática .....	1
1.2 Estado de la Tecnología .....	3
METODOLOGÍA DEL DISEÑO .....	6
2.1 Lista de Requerimientos .....	6
2.2 Estructura de Funciones.....	8
2.3 Matriz Morfológica .....	9
2.4 Conceptos de Solución.....	10
2.5 Evaluación de Soluciones .....	12
2.6 Concepto óptimo .....	13
DISEÑO .....	18
3.1 Diseño Óptico.....	18
3.1.1 Cálculos .....	18
3.1.2 Selección de Componentes.....	21
3.1.2.1 Tubo Láser.....	21
3.1.2.2 Espejos .....	21
3.1.2.3 Enfriador para tubo láser .....	22
3.2 Diseño Mecánico.....	23
3.2.1 Diseño del carro del eje X .....	24
3.2-2 Diseño de ejes guía en X .....	27
3.2-3 Diseño del tornillo de precisión en X .....	29
3.2-4 Diseño del carro del eje Y.....	30
3.2-5 Diseño de ejes guía en Y .....	32
3.2-5 Diseño del tornillo de precisión en Y .....	33
3.2-6 Cálculo de inercia neta – Cálculo del torque de motores.....	34
3.3 Diseño Electrónico .....	39
3.3.1 Diagrama de bloques del circuito electrónico.....	39
3.3.2 Selección de Sensores, Actuadores y Dispositivos de Control.....	40
3.3.2-1 Sensores de Contacto – Microswitch .....	40
3.3.2-2 Actuadores – Motores de paso.....	41

3.3.2.-3 Dispositivos de Control – Tarjeta Arduino UNO .....	41
3.3.3 Esquemáticos y cálculos de los circuitos electrónicos .....	42
3.3.3-1 Esquemático General .....	42
3.3.3-2 Esquemático circuito seleccionador de pulsos .....	44
3.3.3-3 Cálculos del circuito seleccionador de pulsos.....	45
3.3.3-4 Esquemático de etapa de aislamiento de lógica/potencia.....	46
3.3.3-5 Cálculos de etapa de aislamiento de lógica/potencia .....	47
3.3.3-6 Esquemático del Controlador (driver) del motor .....	49
3.3.3-7 Cálculos del Controlador (driver) del motor.....	50
3.4 Diseño de Lógica de Control .....	52
3.4.1 Diagrama de flujo de control principal.....	53
3.4.2 Diagramas de flujo de subrutinas .....	57
3.4.2-1 Subrutina de interrupción para puerta de cabina abierta.....	57
3.4.2-2 Subrutina Generar Puntos (PFL's) y Velocidades.....	59
3.4.2-3 Subrutina MoverMotores .....	61
3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos .....	63
3.4.3-1 Determinación de ecuaciones de curvas.....	63
3.4.3-2 Determinación de vector tangente unitario a una curva .....	66
Dirección del vector velocidad.....	66
3.4.3-3 Calculo de frecuencia de pasos – Rapidez de envío de señal de control (secuencia) y Orden de secuencia (sentido de giro).....	67
COTIZACIÓN .....	87
CONCLUSIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS	



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Problemática

El desarrollo tecnológico se define como el cambio progresivo en el tiempo de las técnicas utilizadas para un proceso o grupos de procesos en general. En el caso del desarrollo tecnológico industrial este se enfoca en la creación y mejora de procedimientos e instrumentos para un determinado sector o producto. En las últimas décadas, con el surgimiento y cambio ininterrumpido que han desplegado las sucesivas revoluciones tecnológicas en los países avanzados, los proveedores industriales se han incrementado y consecuentemente el usuario industrial ha incrementado sus expectativas, con el fin de producir mayores volúmenes a un menor costo y con una mayor calidad. Ante ello la necesidad por incrementar el desarrollo tecnológico industrial ha tomado un carácter mandatorio; que condiciona el éxito de una empresa industrial, un sector especializado e incluso la economía y calidad de vida en un país.

Los procesos industriales han ido evolucionando de acuerdo a las necesidades y capacidades tecnológicas de cada época en particular. [1] En Inglaterra en el año 1760 inicio la Primera Revolución Industrial que se extendió hasta el año 1860, esta tomo su máxima relevancia con la invención de la máquina de vapor por James Watt en el año 1782. Entre otras invenciones se encuentran: la máquina de hilar, un procedimiento para el batido del hierro fundido, ferrocarriles a vapor y el primer cable submarino para comunicación entre América y Europa. [2] La segunda revolución industrial se dio entre los años 1850 y 1970, esta se caracterizó por el surgimiento de nuevas fuentes de energía: la electricidad y el petróleo en reemplazo del vapor, aumentando así la eficiencia de operación de las maquinas. Entre otras invenciones se dio la sustitución del hierro por el acero en la industria, la introducción de maquinaria automática, el telégrafo y el aeroplano. [3] La revolución tecnológica e informática en el siglo XX, dejo claramente sentado el hecho que la ciencia y la técnica son bienes preciados para la sociedad y no solo lo son para la industria. Ello con la invención del televisor, la radio, la energía nuclear, la digitalización y el control remoto de

procesos. [4] Actualmente, en la industria se hace uso de procesos de metrología, creación de aleaciones metálicas, cerámicos y polímeros, fundición, tratamientos térmicos para la fabricación del vidrio, forjado, chapa, maquinado de metales, corte, soldadura, prototipado rápido (RP), procesamiento de circuitos integrados y ensamblaje electrónico y empaclado.

En el caso particular de la aplicación de la tecnología láser a la industria manufacturera, constituye un campo emergente que continua evolucionando, y que está tomando un carácter trascendental para la economía y la sociedad. [5] “Un láser es un dispositivo que hace uso del efecto mecánico cuántico y emisión estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio de acción láser controlado de pureza, tamaño y forma”. Entre sus aplicaciones se encuentran: la Manufactura Rápida por Láser - LRM (por sus siglas en inglés, Laser Rapid Manufacturing), procesos de formado de metal, perforación por láser, corte por láser, soldadura láser, revestimiento de superficies por láser, tratamiento de superficies por láser y metrología láser.

El corte por láser es uno de los procesos más populares en la industria manufacturera en cuanto a lo que se refiere a la aplicación de esta tecnología. [6] Sus beneficios o ventajas en contraste con otros métodos tradicionales de corte (corte de cizalla, oxicorte, corte plasma, etc.) son los siguientes: alta velocidad de corte (ej. laser de CO<sub>2</sub> de 1500W corta acero a 7.5 mm/min), los componentes cortados están disponibles para servicio de forma inmediata sin necesidad de limpieza previa, ancho de corte de alta precisión (entre 0.1 y 1.0 mm), el proceso puede ser controlado en su totalidad por CNC (por sus siglas en inglés, Computer Numerical Control), el área de calentamiento es mínima, no existe contacto con el material a cortar (se evita distorsiones usuales de procesos mecánicos), debido al CNC el material residual puede reducirse al es mínimo (ahorro), los costos de operación son mínimos (rápido retorno de inversión), proceso silencioso (mejora del ambiente de trabajo) y extremadamente seguras.

## 1.2 Estado de la Tecnología

[6] Desde los comienzos del corte láser como un proceso industrial a inicios de 70's, los fabricantes siempre han aumentado la potencia de los laser sostenidamente. Sin embargo, esta siempre ha estado por detrás de las capacidades disponibles, ya que en el corte se requiere un haz de alta calidad que debe poder ser concentrado en un punto pequeño con densidad de energía simétrica, esto es, el láser pueda cortar de forma homogénea en todas las direcciones.

Las maquinas modernas (2004) emplean potencias entre 3.5 kW y 5.5 kW, siendo capaces de grandes cantidades de producción. Entre los parámetros relevantes se encuentran el máximo espesor del material de trabajo y la velocidad de corte. La tabla 1.2.1 muestra los espesores máximos de corte que pueden alcanzarse en función de la potencia y el material de trabajo.

Tabla 1.2.1 Máximos espesores para laser de CO<sub>2</sub> (Tomado de [7])

Máximos Espesores de Materiales para Láser de CO <sub>2</sub>		
Material	Potencia de Láser	
	4 kW	5kW
Acero Dulce	20mm	25mm
Acero Inoxidable	12mm	20mm
Aluminio	10mm	12mm

En los últimos años, los expertos han llegado a ciertas conclusiones sobre las velocidades de corte: no es solo importante la velocidad lineal máxima sino el ciclo de tiempo por cambio de componente y que es mejor reducir la potencia de una máquina para cortar espesores menores y así ahorrar energía. Para maximizar la producción se ha buscado reducir los tiempos de perforación, movimiento de cabezales y entre-cortes. La tabla 1.2.2 muestra las velocidades de corte que actualmente se manejan para líneas rectas a una potencia aproximada de 5kW, en función del material y su espesor.

Tabla 1.2.2 Máximos espesores para laser de CO<sub>2</sub> (Tomado de [7])

Velocidades de Corte para líneas rectas a una potencia de 5kW, con Láser de CO <sub>2</sub>			
Espesor de Material (mm)	Velocidad de Corte (m/min)		
	Acero Dulce (O <sub>2</sub> )	Acero Inoxidable (N <sub>2</sub> )	Aluminio (O <sub>2</sub> )
2	5.85	7.25	8.6
5	4	3	3.1
10	2.35	1.3	0.82
15	1.58	0.7	-
20	1.1	0.42	-
25	0.8	-	-



Hoy en día existen ciertas áreas especializadas en pleno desarrollo como: el corte de perfiles de acero y tuberías de PVC y micro mecanizado orientado a la fabricación de electrónica y biomédica. El funcionamiento de una cortadora láser es relativamente sencillo, ya sea para una que utiliza un láser de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) o una que utiliza un láser de Nd: YAG (neodimio-dopado con itrio-aluminio-granate), que son los más comúnmente utilizados. A continuación pasaremos a detallar este, el cual se puede apreciar en el esquema (Fig.1.2-1). [6] En primer lugar, un haz intenso de luz infrarroja es generado por el láser, este es enfocado en la superficie de la pieza de trabajo mediante lentes. Luego, el haz enfocado calienta el material estableciendo una fusión localizada (generalmente menor a 0.5 mm) a través del espesor de la hoja. El material fundido es expulsado del área de trabajo mediante un chorro de gas presurizado (generalmente localizado de forma coaxial con el láser). En ciertos casos, la mesa de trabajo es movilizada relativamente (CNC) al punto de fusión el cual se encuentra fijo y así logrando el corte deseado. En otros casos, el punto de fusión es desplazado a través de espejos CNC y la mesa de trabajo es la que se encuentra fija, así también logrando el corte deseado. Inclusive existen sistemas híbridos de movimiento en el cual el punto de fusión es desplazado en un eje y la mesa de trabajo en el otro eje.

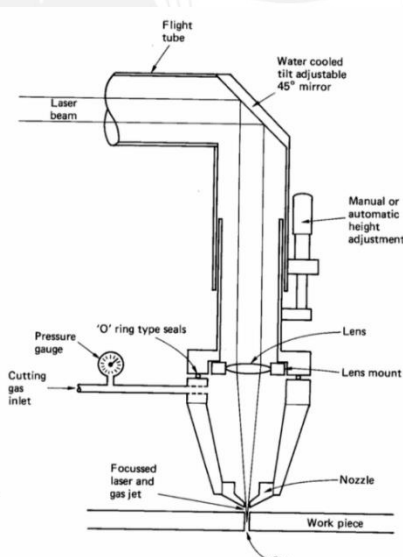


Fig.1.2.1 Esquema de funcionamiento teórico (Tomado de [7])

En cuanto a los tipos de laser utilizados en la industria, como ya lo habíamos, mencionado se encuentran el de CO<sub>2</sub> y el Nd: YAG. Para establecer sus diferencias y ventajas relativas entre ambos, es esencial notar que la longitud de onda del láser de CO<sub>2</sub> es de 10.6 μm aproximadamente, mientras que la del Nd: YAG es de 1.06 μm. Es decir, la longitud de onda del CO<sub>2</sub> es diez veces mayor que la del Nd: YAG. Por ello, el láser Nd: YAG puede ser enfocado en puntos más pequeños, ello implica un trabajo que se puede lograr un acabado de mayor detalle y precisión. Asimismo, el láser Nd: YAG es reflejado con mayor dificultad por materiales de trabajo, son ideales para materiales con alta reflectividad como la plata. También, debido a que la luz del Nd: YAG puede viajar a través del vidrio, puede transportarse y redirigirse usando fibra óptica lo cual es útil cuando existen grandes distancias entre el láser y la pieza de trabajo o cuando el espacio disponible es limitado. En contraparte, la mayoría de materiales orgánicos (plásticos, madera, cuero, jebes naturales) son transparentes a la luz del Nd: YAG, por lo que el tiempo de incidencia del haz no es suficiente para calentar el material respectivo, en consecuencia no se puede realizar el corte, mientras que en el caso de la luz del CO<sub>2</sub> si es posible. Asimismo, es importante notar que el costo del láser de Nd: YAG es mucho mayor que el del láser de CO<sub>2</sub>.

En cuanto a los mecanismos de corte, estos son distinguidos por el material de trabajo y por ende el tipo de láser. El corte por fusión, también conocido como “corte por gas inerte” tiene como material de trabajo metales y termoplásticos, es posible hacer uso de un láser de CO<sub>2</sub> o Nd: YAG. El haz de luz derrite la pieza de trabajo y el material fusionado es expulsado mediante un chorro de gas de corte. Este último es escogido de acuerdo a la reactividad con el material de trabajo. El corte por degradación química tiene como material de trabajo polímeros, madera y derivados de esta, se hace uso de un láser de CO<sub>2</sub>. En este caso, el corte no es logrado por fusión sino por el calentamiento del material de trabajo que libera carbono y otros constituyentes derivados. El corte por evaporación tiene como material de trabajo acrílico, maderas y poliacetal, se hace uso de un láser de CO<sub>2</sub>. En este caso, el corte es realizado mediante evaporación ya que el punto de fusión y ebullición se encuentran bastante separados, debido a ello se logra un corte brillante y pulido. El corte por oxidación tiene como material de trabajo los aceros dulces y aceros al carbono, se puede hacer uso de un láser de CO<sub>2</sub> o Nd: YAG. En este caso, el corte es realizado con un chorro de gas que es de Oxígeno. La reacción producida es bastante agresiva produciendo más calor, lo cual reduce el tiempo de corte y aumenta el máximo espesor de corte posible.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA DEL DISEÑO

#### 2.1 Lista de Requerimientos

En la última década, así como hemos presenciado un desarrollo de la tecnología, este ha impulsado el desarrollo del diseño ingenieril en lo que se refiere al dimensionamiento y uso óptimo de recursos, proveyéndole las herramientas de análisis y diseño necesarias (CAD, CAE, CAM).

Una de las necesidades con mayor demanda por parte de la sociedad (el hogar estándar), estudiantes universitarios y los pequeños negocios, es la precisión en el corte de madera y acrílicos. En el caso del hogar estándar, existe una necesidad por realizar proyectos de carpintería, manualidades o quizás simplemente para entretenimiento y desarrollo de habilidades creativas de los niños. En el caso de los estudiantes universitarios, los estudiantes de Arquitectura y Diseño Industrial requieren elaborar maquetas con escalas de precisión y hacer uso eficiente de su tiempo para elaborar estas, sin perder tiempo en el corte manual. En el caso de los estudiantes de ingeniería es la elaboración de maquetas para probar conceptos de solución a un posible problema de diseño que se les presente. Por otro lado, los negocios de venta de materiales de carpintería y hogar también exigen a causa del mismo cliente, el corte personalizado y de alta calidad superficial, por la variedad de aplicaciones y diseños estéticos que hoy en día circulan.

El presente proyecto de tesis tiene por objeto atender esta necesidad puntual de una gran variedad de potenciales usuarios finales, así como responder a la solicitud de los expertos en el tema. Se diseñara un cortadora laser CNC para el corte de madera y acrílicos.



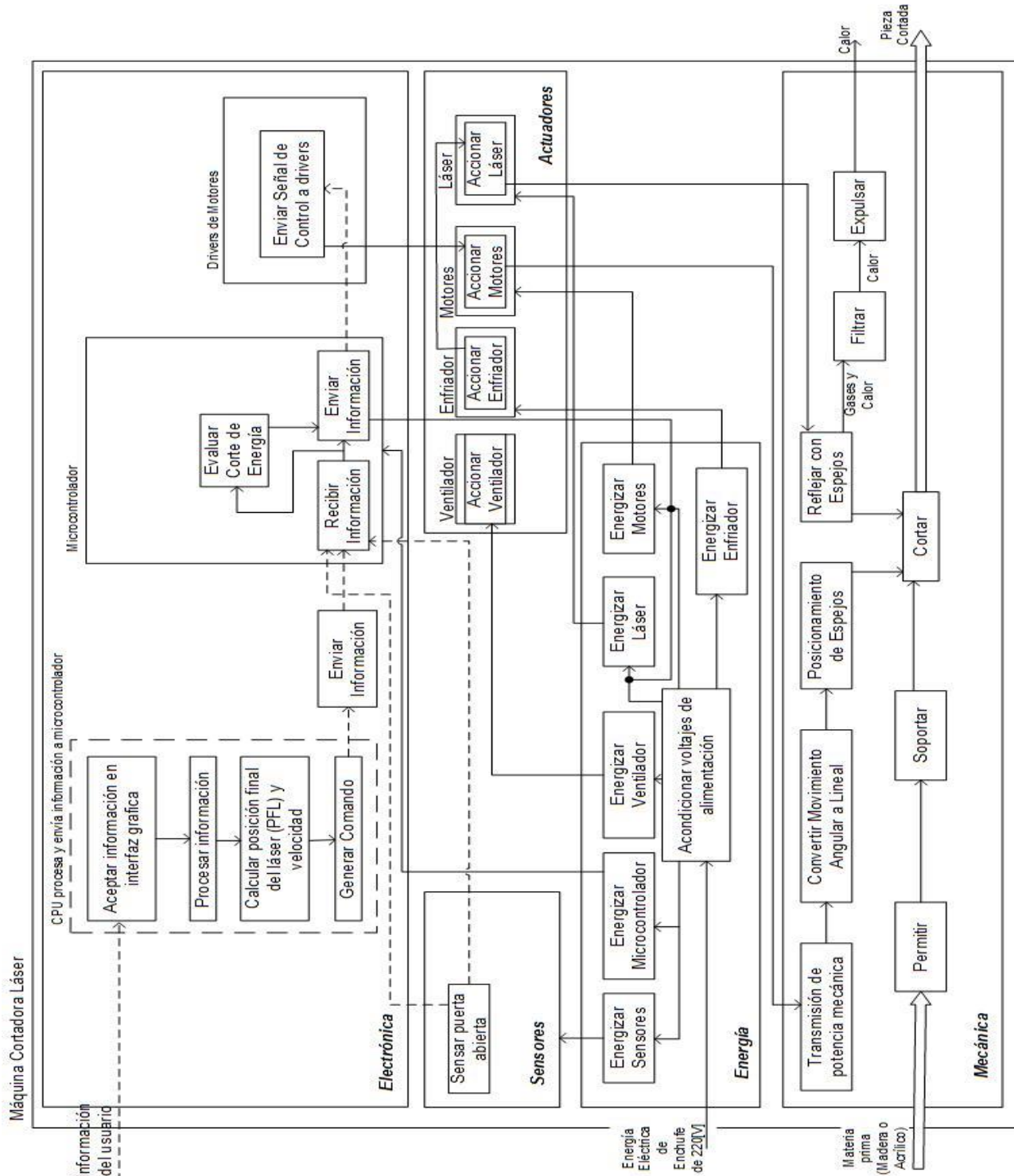
En base a estas necesidades observadas y estas solicitudes, se definen los requerimientos del sistema mecatrónico a diseñar en la siguiente tabla (2.1):

Tabla 2.1: Lista de Requerimientos

<b>Lista de Requerimientos Cortadora Láser CNC para acrílicos y madera</b>		
<b>Nivel de Importancia</b>	<b>Necesidad</b>	<b>Requerimiento Técnico</b>
<b>Mecánica</b>		
7	Durabilidad	Material para estructura de movimiento a utilizar debe ser resistente a corrosión y oxidación
8	Capacidad de corte	Planchas de madera o acrílico de 1m x 1m con 5mm (madera) y 8mm (acrílico) de espesor
7	Velocidad de corte	Máxima de 80 mm/s
8	Nivel de ruido	Operación silenciosa (menor que 40 dB)
8	Versatilidad de Corte	Mecanismo de movimiento será capaz de permitir movimientos rectos y/o curvos
10	Seguridad	Filtros para filtrado de gases residuales nocivos Enfriador para láser Ventilador evacuación de aire caliente
6	Interacción Usuario - Máquina	Facil acceso al material de trabajo y control intuitivo a traves de botones.
<b>Electrónica</b>		
10	Láser	Haz de CO2, con una potencia máxima de 60W
10	Facil energización	Conexión directa a toma eléctrica de 220V
10	Seguridad	Sensado de puerta antes de funcionamiento, efectuar corte eléctrico si se encuentra abierta
10	Precisión de corte	Sensores y Actuadores, que aseguren corte de acuerdo a lo ingresado por el usuario
6	Optimización de espacio	Diseño de tarjeta madre debe ser el menor posible, sin comprometer la integridad del circuito (calor)
7	Comunicación	Puerto de transferencia de datos seguro y rápido
6	Interfaz usuario/máquina	Interfaz en la PC que muestre los parámetros de corte (velocidad, porcentaje de avance, etc)
6	Intercambiabilidad	Tarjetas electrónicas modulables (reparación de etapas independientes)
10	Soporte para control	Circuito capaz de controlar actuadores de movimiento
<b>Control</b>		
10	Control de movimiento	Algoritmos CNC
5	Compatibilidad	Acepta archivos de Corel Draw y AutoCAD
<b>Económico</b>		
8	Bajo Costo	Asequible para pequeños negocios o usuarios domésticos

## 2.2 Estructura de Funciones

En base a los requerimientos definidos, se formula la siguiente estructura de funciones, la cual se muestra a continuación:



## 2.3 Matriz Morfológica

De acuerdo a la estructura de funciones definida anteriormente, se formula la siguiente matriz morfológica, la cual se muestra a continuación:

Funciones	Portadores de función (Alternativas de solución)			
	1	2	3	4
Enviar información CPU a microcontrolador	Wi-Fi	Bluetooth	Puerto Serial	USB
Microcontrolador	PIC	ATMega (Arduino)	National Instruments	PC
Drivers de Motores	Puente H	Control por TRIACS	-	-
Sensar Puerta Abierta	Infrarrojo Emisor - Receptor	Micro - Switch de contacto	Capacitivo	-
Ventilar	Soplador Centrifugo	Ventilador de refrigeración	-	-
Enfriar	Compresor de enfriamiento	Refrigerador Industrial para tubo láser	-	-
Filtrar	Filtro de escape para ventilador	-	-	-
Desplazar (Motores)	Motor DC	Motor de Paso	Servomotor	Motor AC
Láser	Nd : YAG	CO2	-	-
Acondicionar voltajes de alimentación	Transformador	Circuito Rectificador (Puente de diodos)	Circuitos Integrados	-
Transmitir Potencia Mecánica	Faja	Cadena	Eje y/o Engranajes	Acople flexible
Convertir Movimiento Angular a Lineal	Tornillo Sin Fin	Guiado con husillo de bolas	Guias/Correderas	-
Posicionar Espejos	Tornillo Sin Fin	Guias/Correderas	-	-
Reflejar con Espejos	Espejos para Nd : YAG	Espejos Multicapa para CO2 de Si	Espejos Multicapa para CO2 de Mo	Espejos Multicapa para CO2 de Au



## 2.4 Conceptos de Solución

### Concepto de Solución 1 (CS1):

- Enviar información CPU a microcontrolador: Bluetooth
- Microcontrolador: PC
- Drivers de Motores: Controlado por TRIACS
- Sensor Puerta Abierta: Infrarrojo Emisor - Receptor
- Ventilar: Soplador Centrífugo
- Enfriar: Compresor de enfriamiento
- Filtrar: Filtro de escape para ventilador
- Desplazar (Motores): Motor AC
- Láser: CO2
- Acondicionar Voltajes de Alimentación: Todos
- Transmitir Potencia Mecánica: Faja
- Convertir Movimiento Angular a Lineal: Guías/Correderas
- Posicionar Espejos: Guías/Correderas
- Reflejar con espejos: Espejos Multicapa para CO2 de Mo

Concepto de Solución 2 (CS2):

- Enviar información CPU a microcontrolador: USB
- Microcontrolador: ATmega (Arduino)
- Drivers de Motores: Puente H
- Sensor Puerta Abierta: Micro – Switch de contacto
- Ventilar: Ventilador de Refrigeración
- Enfriar: Refrigerador industrial para tubo láser
- Filtrar: Filtro de escape para ventilador
- Desplazar (Motores): Motor de Paso
- Láser: CO2
- Acondicionar Voltajes de Alimentación: Todos
- Transmitir Potencia Mecánica: Acople flexible
- Convertir Movimiento Angular a Lineal: Husillo de Bolas
- Posicionar Espejos: Guías/Correderas
- Reflejar con espejos: Espejos Multicapa para CO2 de Si

## 2.5 Evaluación de Soluciones

A continuación, se pasará a evaluar los posibles conceptos de solución (2.3) de acuerdo a los criterios técnicos y económicos establecidos (1.3), con sus respectivos niveles de importancia.

Siendo el puntaje para calificar (de 0 a 4), el siguiente:

0= No Satisface

1= Aceptable

2= Suficiente

3= Bien

4= Muy Bien

No.	Criterios Técnicos y Económicos	Nivel de Importancia	Soluciones	
			1	2
1	Durabilidad	7	2	3
2	Capacidad de corte	8	4	4
3	Velocidad de corte	7	3	3
4	Nivel de ruido	8	3	3
5	Versatilidad de corte	8	3	3
6	Seguridad Mecánica	10	3	3
7	Interacción Usuario - Máquina	6	2	2
8	Láser	10	4	4
9	Facil Energización	10	4	4
10	Seguridad Electrónica	10	2	4
11	Precisión de corte	10	2	4
12	Optimización de espacio	6	2	3
13	Comunicación	7	1	3
14	Interfaz Usuario - Máquina	6	2	3
15	Intercambiabilidad	6	3	3
16	Soporte para control	10	3	4
17	Control de movimiento	10	3	4
18	Compatibilidad	5	3	3
19	Bajo costo	8	2	3
		<b>Suma Total</b>	<b>417</b>	<b>518</b>

De lo anterior concluimos que el concepto óptimo de solución a desarrollarse para el presente proyecto de tesis, será el número 2.

## 2.6 Concepto óptimo

Teniendo en cuenta el concepto de solución óptimo 2, referente al diseño de la cortadora laser CNC para el corte de madera y acrílicos. En esta sección se detallará los portadores de función elegidos y se analizará cómo cada uno de estos cumple de la mejor manera los requerimientos establecidos.

En cuanto al envío de información CPU a microcontrolador, la conexión Wi-Fi es la opción más costosa, presenta posibles problemas de comunicación por interferencia de ondas electromagnéticas y la complejidad de programación es mayor. De forma similar sucede con la conexión Bluetooth. En el caso de la conexión por puerto serial su costo es mucho menor, no presenta posibles problemas de comunicación complejos y la programación es sencilla. Esto mismo sucede para la conexión USB, sin embargo se elige esta última frente a la conexión serial, ya que la tarjeta Arduino que aloja el microcontrolador elegido ATmega cuenta con un puerto USB y un chip para la transferencia y recepción de datos.

En cuanto al microcontrolador, en el caso del PIC su juego de instrucciones es bastante reducido por lo cual la complejidad de programación se puede incrementar al momento de codificar la lógica de control, además de luego ser inflexible para una posterior optimización o corrección de parámetros. En cuanto a las tarjetas de National Instruments su costo es considerable y el código no es abierto. En cuanto a usar la PC como microcontrolador la dificultad sería el envío y recepción de señales directamente entre la parte electrónica y esta. Por otro lado, la tarjeta Arduino la cual aloja un microcontrolador ATmega, tiene un costo bajo, su código es abierto y no existe dificultad para la comunicación con la parte electrónica.

En cuanto a los drivers de los motores, el control por TRIAC se encuentra ligado a un motor AC y su costo, si se piensa en una producción masiva de estas cortadoras láser y la asequibilidad para el consumidor, puede llegar a ser considerable. Por otro lado, el control por puente H tiene un menor costo, la precisión y robustez que ofrece para el control del posicionamiento final del láser (PFL) es satisfactoria, en cuanto al tiempo de conmutación (respuesta).

En cuanto al sensor de puerta abierta, el sensor capacitivo ofrece gran robustez en lo que se refiere a la detección de presencia a pesar que se puedan variar condiciones ambientales como la temperatura o humedad, asimismo su calibración o configuración suele requerir múltiples pruebas de sintonización (capacitancias) y su costo es el más elevado en entre las opciones. El sensor infrarrojo emisor - receptor exhibe cierta sensibilidad ante cambios ambientales como condiciones de luz y temperatura, no requiere de una configuración dificultosa, en lo que se refiere a sintonización de parámetros y su costo es menor al sensor capacitivo. Por otro lado, el sensor de contacto (micro - switch) no presenta problemas de robustez relacionado a condiciones ambientales, ya que su funcionamiento es por contacto físico con el cuerpo a sensar, asimismo su configuración es nula (sintonización de parámetros) y su costo es menor que el sensor capacitivo e infrarrojo.

En cuanto a la ventilación que se requiere posterior al corte, los sopladores centrífugos suelen tener una alta capacidad de enfriamiento y eficiencia, un mayor costo y también un mayor tamaño. Por otro lado, los ventiladores de refrigeración suelen tener una capacidad intermedia de enfriamiento y eficiencia, un costo menor a los sopladores centrífugos y también dependiendo del fabricante y modelo un menor tamaño. Para la aplicación de corte laser de madera y acrílicos, es suficiente esta última opción para evacuar el calor de forma eficaz y asimismo mantener un tamaño reducido de la máquina.

En cuanto al enfriamiento que se requiere para el tubo láser, el compresor de enfriamiento tiene una alta capacidad, pero deberá direccionarse la circulación del aire usando mangueras, asimismo tiene un costo y tamaño significativo. Por otro lado, el refrigerador industrial para tubo láser como su nombre lo indica está especialmente diseñado para el enfriamiento de este por lo que la complejidad del montaje, direccionamiento del aire, es nulo. Asimismo, tiene un costo similar al compresor y un tamaño menor.



En cuanto al filtrado que se requiere separar partículas de los gases que se liberarán después del corte de la madera o el acrílico, el filtro de escape para ventilador es una solución sencilla a este problema, pequeño y adaptable al espacio disponible en la salida del ventilador, además de barato, ello es importante a tener en cuenta porque tendrá que ser reemplazado con regularidad (costos de mantenimiento).

En cuanto al desplazamiento de los motores, los motores AC tienen la capacidad de poder generar un mayor torque en comparación a los demás, sin embargo suelen ser más grandes y su costo suele ser mayor. Más allá de eso, el control de estos es mucho más complicado y debe usarse retroalimentación, lo cual involucraría no solo dificultad en el diseño sino también un costo extra en la adquisición de sensores para poder monitorear posición o velocidad. Los servomotores son capaces de generar un torque constante hasta la velocidad nominal, es posible conseguir tamaños reducidos y su costo es menor al motor AC, sin embargo para su control también requieren de retroalimentación y el inconveniente que presentan en tal sentido es el mismo que los motores AC. Los motores de paso son capaces de generar un torque mayor que los servomotores, en pérdida clara de velocidad, sin embargo para la aplicación de corte la prioridad principal es la calidad de este y no tanto el tiempo de ejecución, sino más bien poder movilizar las estructuras con los espejos sin esfuerzos o vibraciones que se puedan generar debido a un bajo torque. El costo de estos es ligeramente menor que los servomotores y no requieren de un control con retroalimentación sino que funcionan en lazo abierto. Este último factor es determinante, pues en el caso de un motor de paso se controla directamente la posición del motor, ello asegura un corte preciso y fiable.

En cuanto al láser, como ya se había discutido en el estado de la tecnología (1.2), el láser Nd: YAG tiene una longitud de onda tal que, materiales como la madera y acrílicos son transparentes ante este y no es suficiente para calentarlos y por ende realizar un corte. En el caso del láser de CO<sub>2</sub> su longitud de onda si permite calentar madera y acrílicos, además tiene un costo muy inferior con respecto al Nd: YAG.

En cuanto al acondicionamiento de voltajes de alimentación, estos implican el láser, los motores, el microcontrolador y el driver de los motores. Se utilizarán todas las opciones listadas, es decir, el transformador, circuito rectificador y circuitos integrados. En el caso del primero, este permitirá reducir la tensión de entrada pero seguirá siendo alterna. El segundo permitirá convertir la tensión alterna a continua, mientras que el tercero permitirá reducir estas tensiones en magnitud de acuerdo al dispositivo que se requiera alimentar. Cada uno será tratado a detalle en la sección electrónica (3.3), por ahora se pretende dejar claro que cada uno es imprescindible y la relación secuencial que existe entre estos.

En cuanto a la transmisión de potencia, las fajas eran una opción eficiente sin embargo tienen un elevado costo y el espacio necesario que involucran es inapropiado para los usuarios interesados en la máquina, como se ha dispuesto se espera utilizar en un negocio pequeño o inclusive en un hogar. La cadena no tiene una eficiencia tan alta y es más adecuada para transmisiones de alta potencia, el cual no es el caso, además de ello la transmisión no es síncrona, lo cual evita poder combinar con precisión los movimientos en dos ejes para lograr el movimiento en el plano. Su costo es también elevado y ocupa un espacio considerable. Los engranajes usualmente tienen una eficiencia media, además requieren de mantenimiento constante en lo que se respecta a lubricación. Por otro lado, el acople flexible permite absorber y amortiguar discontinuidades en el torque, es ligero, admite mayores tolerancias por lo que su costo es menor y en comparación a los anteriores o un acople rígido absorbe posibles vibraciones hasta cierto punto.

En cuanto a la conversión de movimiento angular a lineal, el tornillo sinfín permite la transmisión de potencia en espacios reducidos con una eficiencia aceptable, sin embargo ante cargas altas existen riesgos de problemas de calentamiento por fricción. Por otro lado, los husillos de bolas suelen ocupar un poco más de espacio que los anteriores pero tienen una mayor eficiencia y son capaces de soportar altas cargas sin problemas. Ello se debe a que el husillo de bolas, posee un eje roscado con forma de camino helicoidal en el cual se encuentran los rodamientos de bolas, es entonces que el movimiento se realiza por rotación y no deslizamiento lo cual implica menores pérdidas por fricción, además ya que el esfuerzo se reparte entre varias bolas es por eso que es capaz de resistir cargas elevadas.

En cuanto al posicionamiento de espejos, del punto anterior queda implícito que en conjunto al husillo de bolas se utilizará, un carro con una tuerca interna, el cual se desplazará a través de un sistema de guías o correderas.

En cuanto al reflejo del láser con espejos, los espejos multicapa a utilizarse serán los de Silicio (Si) por ser una potencia de corte muy baja la que va a utilizarse (ver requerimientos, alrededor de 60W), además de tener un costo bajo en comparación a los de Molibdeno (Mo) y desde luego en comparación a los de Oro (Au).



## CAPÍTULO 3

### DISEÑO

En este capítulo se detallará toda la ingeniería de diseño de la cortadora laser CNC para el corte de madera y acrílicos. Para ello, se dividirá en las siguientes secciones, las cuales tienen un orden sucesivo y lógico el cual se irá haciendo evidente: Óptica, Mecánica, Electrónica y Control.

#### 3.1 Diseño Óptico

##### 3.1.1 Cálculos

En esta sección, se analizará la potencia máxima del láser requerida para el corte y la máxima velocidad de avance correspondiente a los motores.

Tanto la madera como los acrílicos son considerados materiales “blandos”, para un diseño óptimo es necesario tomar el caso crítico en lo que se refiere al material más resistente al corte, que requiere mayor calor de vaporización y por ende mayor potencia del láser. Para ello, se tomó en cuenta textos académicos [5] y [7], investigaciones [8] y modelos existentes en este rubro (antecedentes). Resultado de lo anterior se encontró que uno de los materiales más utilizados en la industria y más resistente entre maderas y acrílicos, es el Polimetilmetacrilato (PMMA). Este tiene una alta resistencia a la intemperie, rayado, es un excelente aislante térmico y acústico y es altamente transparente; por ello es utilizado como material de faros de carros, en arquitectura (mamparas separadoras y/o decorativas), diseño de luminaria e inclusive en la medicina para prótesis dentales y óseas. Así como sus propiedades lo hacen un material muy apreciado y utilizado en la variedad de industrias que se mencionan, para nuestro diseño estas propiedades como la alta transparencia (alrededor del 93%) y buen aislante térmico, suponen un caso crítico y dificultoso para el corte con láser. Recordemos que la alta transparencia de un material reduce el tiempo de incidencia del haz (ver 1.2 Estado de la Tecnología), no permite calentar eficientemente la zona incidente de trabajo (punto de corte). Y evidentemente, la propiedad de aislante térmico, dificultará la propagación del flujo de calor a través del espesor del material.

Teniendo en cuenta que el mecanismo de corte a utilizarse será por evaporación (ver 1.2 Estado de la Tecnología) debido a que se trata de maderas y acrílicos se procede al cálculo de la potencia máxima requerida del láser para el corte de PMMA. Conforme a [7] si se realiza un balance energía para la transferencia de calor, se asume que está genera solo evaporación y que los gases son expulsados antes que se dé flujo de calor por conducción (simplificación de la expresión 3.2 de la Fuente [7]) y se asume unidimensional, entonces se tiene la siguiente expresión:

$$\eta P = w t V \rho (C_p \cdot \Delta T + L_v) \quad \left[ \frac{J}{m^2} \right]$$

Donde:

$\eta$  : Eficiencia del acople

$P$  : Potencia incidente

$w$  : Ancho de corte

$t$  : Espesor de corte

$V$  : Velocidad de avance

$\rho$  : Densidad del material a cortar

$C_p$  : Capacidad calorífica del material a cortar

$\Delta T = T_e - T_{amb}$  : Aumento de temperatura debido a fusión, diferencia entre temperatura de ebullición del material a cortar y temperatura ambiente.

$L_v$  : Calor latente de evaporación

En nuestro caso las variables en mención toman los siguientes valores críticos: la eficiencia del acople  $\eta = 0.8$  (usualmente entre 0.8 y 0.9),  $w = 0.001 [m]$  ancho de corte (visto desde planta, parámetro relacionado al haz del láser),  $t = 0.002 [m]$  profundidad de corte, velocidad de corte o avance  $V = 0.025 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , densidad del PMMA  $\rho = 1190 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ , capacidad calorífica del PMMA  $C_p = 1470 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ , temperatura de ebullición del PMMA  $T_e = 473.15 [K]$  y la temperatura ambiente promedio dentro de la cabina de corte  $T_{amb} = 296.15 [K]$  y un calor latente de evaporación para el PMMA  $L_v = 25100 \left[ \frac{J}{kg} \right]$ .



$$(0.8) P = (0.001) (0.002) (0.05) (1190) ((1470) \cdot ((473.15) - (296.15)) + (25100))$$

$$P = 42.44 \left[ \frac{J}{s} \right]$$

Por lo tanto, se sobredimensionará la potencia usando un láser de 50 [W].

Para el cálculo de la máxima velocidad de avance se utilizarán los resultados experimentales hallados en la investigación académica [8]. En esta se modela la relación de la velocidad de corte y el espesor de corte, como una función de decreciente de carácter exponencial:

$$V = P \cdot Q \cdot t^{-B} \quad \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

Se itera con los valores de los espesores, para hallar la velocidad máxima requerida:

Tabla 3.1.1 Velocidades de corte en función de espesores

P [W]	Q	t [mm]	B	V [mm/min]	V [mm/s]
50	74.57	1	1.362	3728.5	62.14167
		2		1450.54529	24.17575
		3		835.016387	13.91694
		4		564.3238942	9.405398
		5		416.4251986	6.94042
		6		324.8569365	5.414282
		7		263.3362319	4.388937
		8		219.5460284	3.6591

Por lo tanto, la velocidad máxima requerida será 62.14 [mm/s] para un espesor mínimo de 1 [mm], se sobredimensionará a 80 [mm/s]. Obsérvese también que el hecho que esta velocidad máxima se presente en el mínimo espesor se debe a que físicamente si el tiempo de exposición del material al láser es excesivo, este se deformará de forma aleatoria (acabado superficial de baja calidad), al contar con un menor espesor el tiempo de exposición debe ser menor y por ende la velocidad de corte debe ser mayor.

## 3.1.2 Selección de Componentes

### 3.1.2.1 Tubo Láser

En base a los cálculos anteriormente realizados en la sección (3.1.1) se selecciona como tubo láser el modelo 48-5(S) W del fabricante Synrad con una potencia de salida o incidente de 50 [W] (ver hoja de datos en Anexos). Este se encuentra empacado en una estructura de prisma rectangular con dimensiones (largo x ancho x altura) de 886x135x114 [mm], el largo no excede el espacio de trabajo definido en (1.3), es menor a 1 [m]. Asimismo, es ligero con un peso de 20 [kg]. Requiere de una alimentación de 30 [VDC] / 28 [A], puede ser operado en un ciclo de trabajo del 0 – 100 % con un señal de control PWM y es controlado directamente a través de una señal TTL.



Fig. 3.1.2.1-1 Tubo Láser 48-5(S) W Synrad

### 3.1.2.2 Espejos

Del mismo fabricante Synrad se selecciona un espejo del tipo retardador de fase de  $90^\circ$  (también conocidos como  $\lambda/4$ ) modelo 1.25" Series Beam Bender PLBBA0041. Tengamos en cuenta que el haz directo del láser se encuentra polarizado linealmente, la función de este es polarizar el láser radialmente para obtener un corte homogéneo.



Fig. 3.1.2.2-1 1.25" Series Beam Bender PLBBA0041

### 3.1.2.3 Enfriador para tubo láser

Como su nombre comercial lo indica este enfriador está especialmente diseñado para mantener la temperatura del tubo láser en valores admisibles ( $18^{\circ}\text{C}$  -  $22^{\circ}\text{C}$ ) que no pongan en riesgo la integridad del láser en operación o su vida útil. El enfriamiento se da a través del flujo de agua. Se selecciona el CW3000AG, que requiere de una alimentación de 220 VAC con una corriente de 0.45 A. Es apto para tubos láser con una potencia de salida o incidente de hasta 80 [W], el tubo láser seleccionado tiene 50 [W] por lo que cumple el requerimiento en este aspecto. Asimismo, provee un flujo de enfriamiento de hasta 10 [L/min], el tubo láser seleccionado requiere de un máximo de 1.5 [GPM] (ver hoja de datos en Anexos) que es equivalente a 5.685 [L/min], por lo que también cumple el requerimiento en este aspecto.



[11] Fig. 3.1.2.3-1 Enfriador para tubo láser CW3000AG

### 3.2 Diseño Mecánico

En esta sección, se analizará los esfuerzos y torques que deberán soportar los componentes del mecanismo de movimiento, con el fin de dimensionar y seleccionar los materiales de estos.

En Fig.3.2-1 se puede apreciar el mecanismo de movimiento diseñado, este consta de dos estructuras, una en el eje X y otra en el eje Y, las cuales se soportarán en las guías cilíndricas (superior e inferior), con un tornillo de precisión entre estas dos. Un carro en el eje X se desplazará a través de estas, este mismo soportará el peso del cabezal láser. Un carro en el eje Y, desplazará en conjunto la estructura del eje X, es decir este soportará la mayor carga.

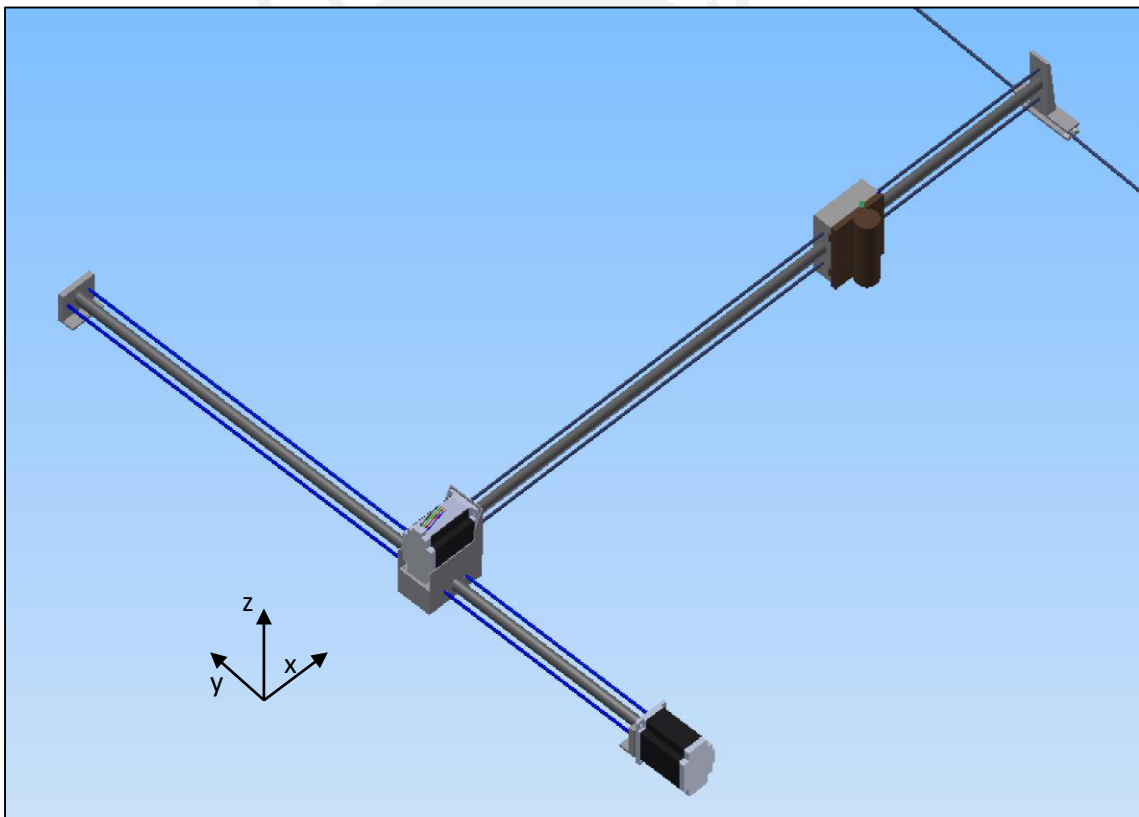


Fig.3.2-1 Mecanismo de movimiento

La estructura del eje X se muestra en mayor detalle en Fig.3.2-2. En esta se aprecia el carro que desplaza el cabezal láser y su soporte, sobre las dos guías cilíndricas y el tornillo de precisión. Este último permitirá la conversión del movimiento angular del motor (Fig.3.2-2 parte inferior izquierda) en movimiento de traslación lineal. El motor se encuentra alojado en una base que será atornillada al carro del eje Y, en esta misma base está instalado el sensor de contacto (microswitch) usado con propósitos de determinar el fin de carrera (ver 3.3.2-1 Sensores de Contacto-Microswitch). En el otro extremo se tiene una base con rodajes que se desplaza en una guía, solo con propósitos de estabilidad.

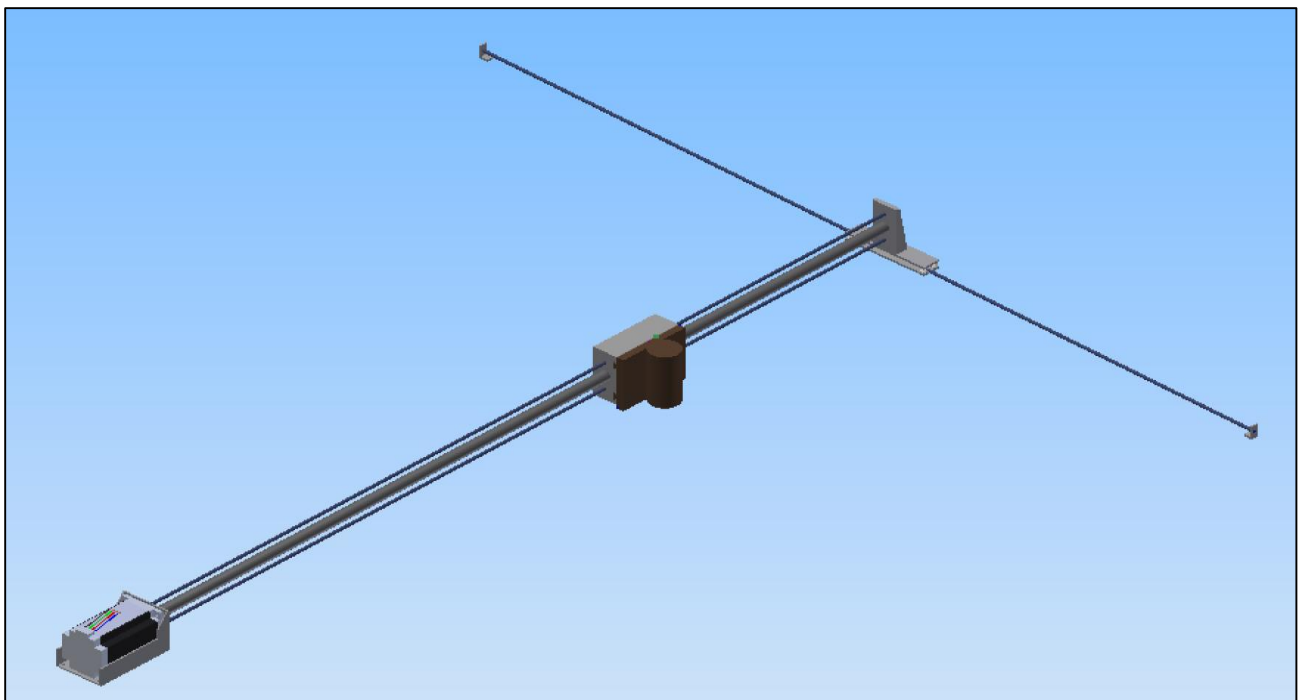


Fig.3.2-2 Estructura del eje X

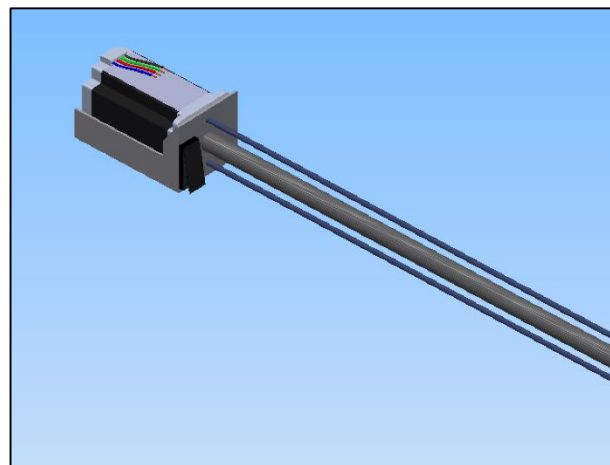


Fig.3.2-3 Ubicación del sensor de contacto eje X



La estructura del eje Y se muestra en mayor detalle en Fig.3.2-4. En esta se aprecia el carro que será atornillado a la base que aloja el motor en el eje X. De igual manera este carro del eje Y, se desplaza sobre dos guías cilíndricas y un tornillo de precisión. En Fig. 3.2-5 se aprecia el sensor de contacto (microswitch), instalado en uno de los soportes (inferior izquierdo) al cual está conectado el motor, este también usado con el propósito de determinar el fin de carrera en este eje (Y) (ver 3.3.2-1 Sensores de Contacto-Microswitch).

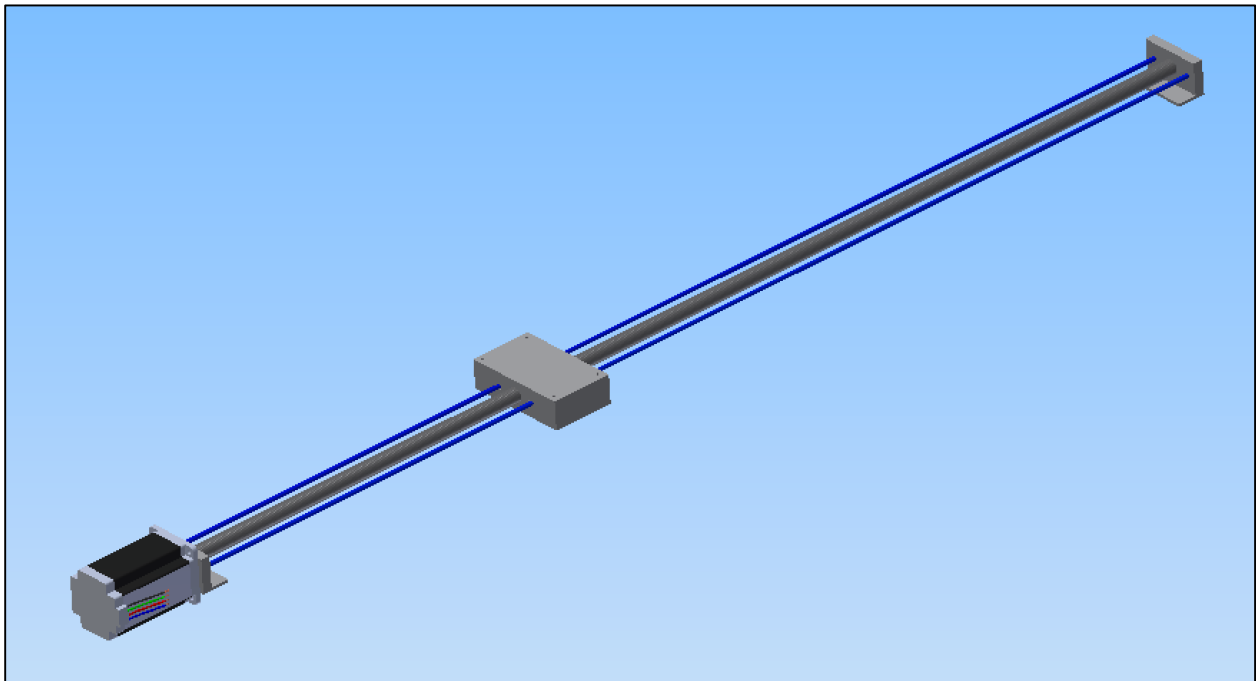


Fig.3.2-4 Estructura del eje Y

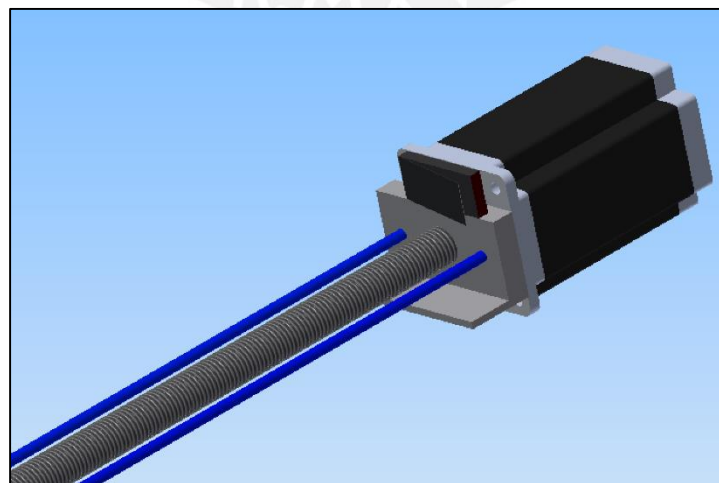


Fig.3.2-5 Ubicación del sensor de contacto eje Y

### 3.2.1 Diseño del carro del eje X

El carro en el eje X deberá soportar únicamente el peso del cabezal láser:

$$W = m_{\text{cabezal}} \cdot g$$

$$W = 2[\text{kg}] \cdot 9,8$$

$$W = 19,6 [\text{N}]$$

El diseño de este se muestra a continuación (Fig.3.2.1-1):

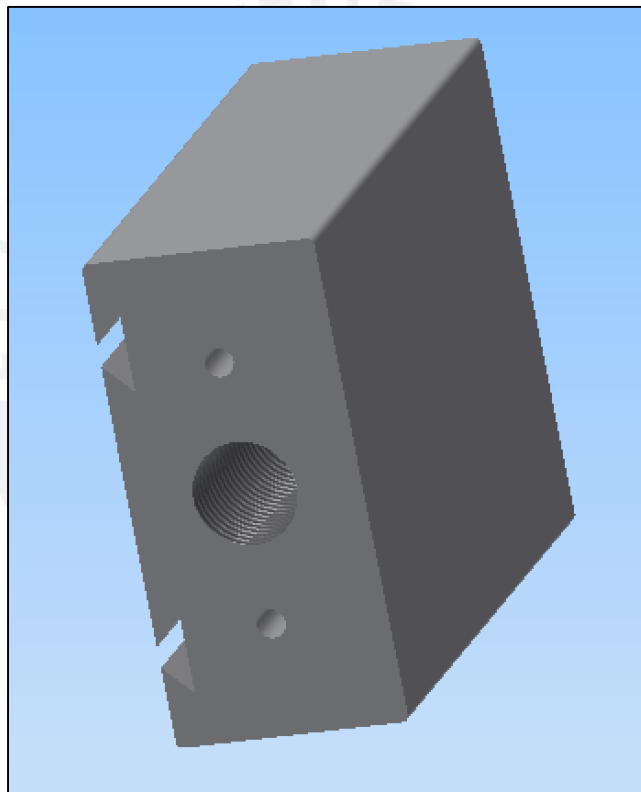


Fig. 3.2.1-1 Carro del eje X

Para el diseño se eligió como material una aleación de bronce con un esfuerzo de fluencia  $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$ . Considerando un factor de seguridad de  $N=3$ , el máximo esfuerzo permisible será de:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{240}{3} \rightarrow \sigma_{\text{max}} = 80 \text{ MPa}$$

Para el estudio del máximo esfuerzo sobre el carro del eje X se utilizó el paquete de Autodesk Inventor. Se consideraron esfuerzos perpendiculares al eje de movimiento, mas no esfuerzos coaxiales pues la fricción generada en el eje roscado y guías es despreciable en comparación al generado por el peso del cabezal láser, además de ello para las guías y eje roscado se indicará una película de lubricación con aceite lo cual disminuye más aun la fricción.

Utilizando el criterio de Von Mises los esfuerzos simulados son los siguientes:

$$\sigma_1 = 19,87 \text{ MPa} < 80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 16,23 \text{ MPa} < 80 \text{ MPa}$$

### 3.2-2 Diseño de ejes guía en X

Los ejes guía en el eje X cumplen la función de guiar el elemento motriz lineal en este caso el carro que porta el cabezal láser.

El diseño de estos se muestra a continuación (Fig. 3.2.2-1):

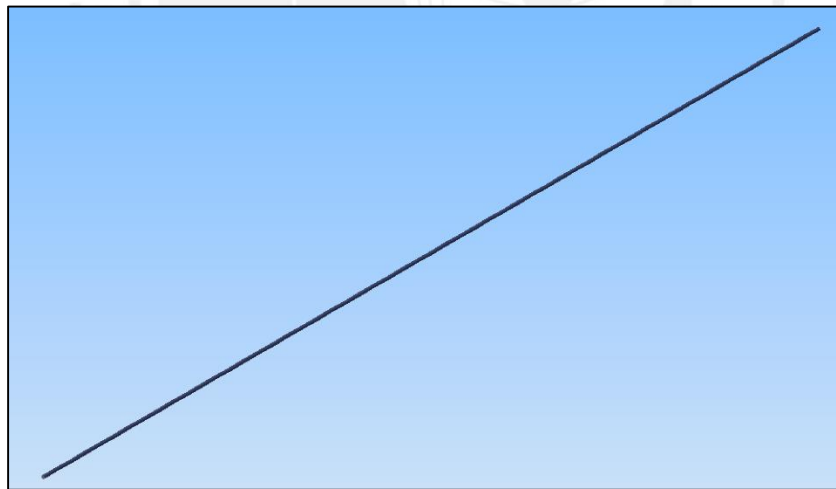


Fig. 3.2.2-1 Eje guía en X

En primer lugar, calcularemos el diámetro apropiado en función de momento flector máximo que deberá soportar el eje guía, este será producido por el peso del cabezal láser. Con el paquete de Autodesk Inventor se obtuvo como momento flector máximo de  $5823 \text{ N} \cdot \text{mm}$ .

De acuerdo a Budynas y Nisbett [9] el factor de seguridad apropiado para el transporte guiado de una herramienta en una máquina pequeña es de 2. Asimismo, se propone utilizar un acero inoxidable SAE 304, debido a que este es el más popular y económico en la industria. El SAE 304 tiene un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_y = 310 \text{ MPa}$ .

Teniendo en cuenta el factor de seguridad  $N=2$ , el máximo esfuerzo permisible será de:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{310}{2} \rightarrow \sigma_{max} = 105 \text{ MPa}$$

Por resistencia de materiales, en una sección circular, la relación entre el momento de inercia, el momento flector y esfuerzo será:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} y}{I}$$

Donde R es el radio de la sección circular:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} R}{\frac{\pi}{4} R^4}$$

Reemplazando y despejando el radio R:

$$105 \frac{N}{mm^2} = \frac{(5823 \text{ N} \cdot mm)}{\frac{\pi}{4} R^3}$$

$$R = 4.13 \text{ mm} \rightarrow D = 8.26 \text{ mm}$$

Se toma una medida comercial ofrecida en el mercado local, por ejemplo, por Aceros Arequipa de 3/8 de pulgada, esto es 9.5 mm.

Así las guías cilíndricas en el eje X tendrán un diámetro de 9.5 mm y un largo de 1500 mm, suficiente para caber en la máquina una plancha de 1m x 1m como se propuso.

### 3.2-3 Diseño del tornillo de precisión en X

Para el diseño del tornillo de precisión será necesario en una primera instancia asumir un material de trabajo. Basado en el hecho que se pretende seleccionar un tornillo de precisión ofrecido del fabricante SKF, serie SDS/BDS/SHS (ver catálogo en Anexos). Los diámetros ofrecidos oscilan entre 6 mm y 16 mm, de esta manera si al finalizar los cálculos obtenemos un diámetro menor a 16 mm y mayor a 6 mm, lo asumido estará correcto. Estos son de acero inoxidable similar al AISI 420, con un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$ .

De acuerdo a Budynas y Nisbett [9] el factor de seguridad apropiado para el transporte de una herramienta en una máquina pequeña es de hasta 3 ( $N=3$ ).

Nuevamente, el esfuerzo máximo permisible será de:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{345}{3} \rightarrow \sigma_{max} = 115 \text{ MPa}$$

Con el paquete de Autodesk Inventor se obtuvo como momento flector máximo de  $11514 \text{ N} \cdot \text{mm}$ .

De forma análoga, por resistencia de materiales, en una sección circular, la relación entre el momento de inercia, el momento flector y esfuerzo será:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} y}{I}$$

Donde R es el radio de la sección circular:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} R}{\frac{\pi}{4} R^4}$$

Reemplazando y despejando el radio R:

$$115 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \frac{(11514 \text{ N} \cdot \text{mm})}{\frac{\pi}{4} R^3}$$

$$R = 5.03 \text{ mm} \rightarrow D = 10.06 \text{ mm}$$

El diámetro calculado se encuentra en el rango esperado y se selecciona el tornillo de precisión SDS/BDS 12x2 R del fabricante SKF. Con una densidad lineal de masa de  $0,67 \text{ kg/m}$ , una densidad lineal de inercia de  $10 \text{ kg mm}^2 / \text{m}$ , un paso de  $2 \text{ mm}$  y una longitud máxima de  $2000 \text{ mm}$  (ver catálogo en Anexos).



### 3.2-4 Diseño del carro del eje Y

Para el diseño del carro del eje Y, debemos tener en cuenta que este desplazará en conjunto la estructura del eje X. Ello implica que deberá soportar el peso del tornillo de precisión del eje X, las guías y el cabezal láser:

$$W_y = m_{\text{tornillo\_precisión}} \cdot g + 2(m_{\text{guías}} \cdot g) + m_{\text{cabezal}} \cdot g$$

Donde  $m_{\text{tornillo\_precisión}}$  se puede determinar de la densidad lineal de masa, mencionada en la sección anterior:

$$\lambda = \frac{m_{\text{tornillo\_precisión}}}{L_{\text{tornillo\_precisión}}}$$

$$0,67 = \frac{m_{\text{tornillo\_precisión}}}{1,5}$$

$$m_{\text{tornillo\_precisión}} = 1,005 \text{ kg}$$

Y  $m_{\text{guías}}$  se puede determinar teniendo en cuenta la densidad del SAE 304, de aproximadamente  $7800 \text{ kg/m}^3$  entre  $8000 \text{ kg/m}^3$ , tomaremos el caso crítico con la mayor densidad:

$$\rho = \frac{m_{\text{guía}}}{V_{\text{guía}}} = \frac{m_{\text{guía}}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L}$$

$$8000 = \frac{m_{\text{guía}}}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,0095^2 \cdot 1,5}$$

$$m_{\text{guía}} = 0,851 \text{ kg}$$

Reemplazando:

$$W_y = (1,005) \cdot (9,81) + 2((0,851) \cdot (9,81)) + (2) \cdot (9,81)$$

$$W_y = 46,176 \text{ N}$$

El diseño del carro del eje Y se muestra a continuación (Fig.3.2.4-1):

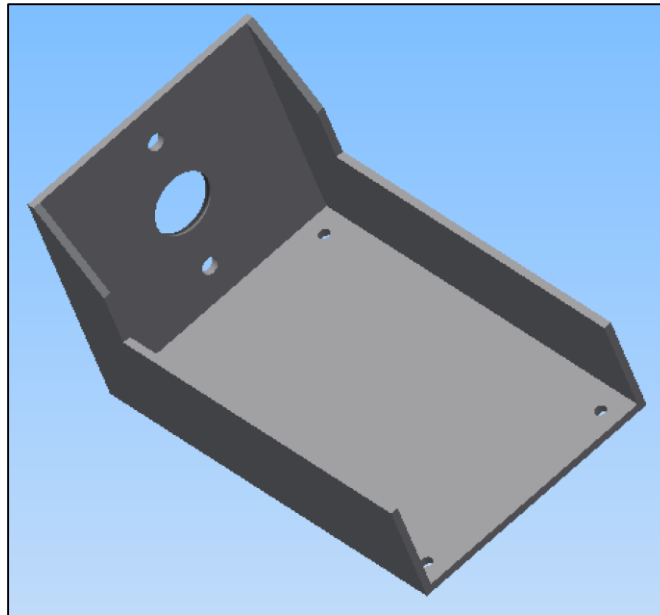


Fig.3.2.4-1 Carro del eje Y

Se eligió como material una aleación de bronce con un esfuerzo de fluencia  $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$ . Considerando un factor de seguridad de  $N=2$ , el máximo esfuerzo permisible será de:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{240}{2} \rightarrow \sigma_{max} = 120 \text{ MPa}$$

Con el paquete de Autodesk Inventor se simuló un sistema de fuerzas equivalentes perpendiculares a la base. Utilizando el criterio de Von Mises, se obtuvo como momento flector máximo de  $101.9 \text{ MPa}$ , de manera que:

$$\sigma_{real} < \sigma_{max}$$

$$101,9 \text{ MPa} < 120 \text{ MPa}$$

### 3.2-5 Diseño de ejes guía en Y

Los ejes guía cumplen la función de guiar el mecanismo del eje Y y a su vez soportar parte del peso o carga del mecanismo del eje X.

El diseño de estos se muestra a continuación (Fig. 3.2.5-1):

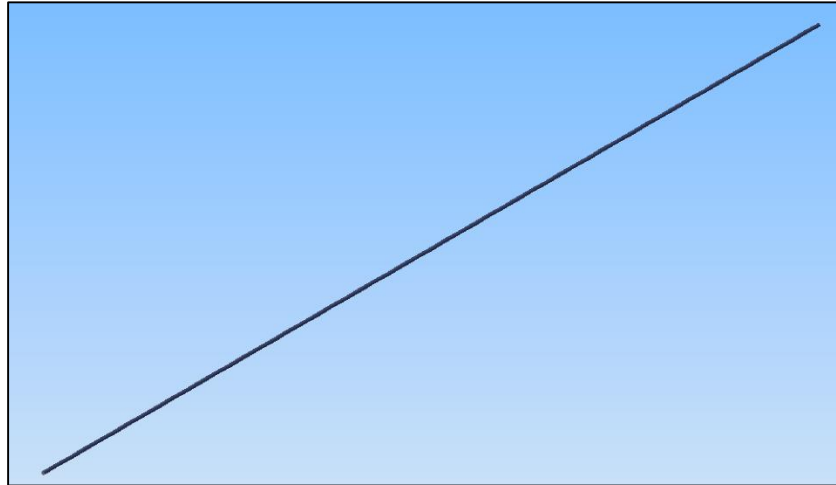


Fig.3.2.5-1 Eje Guía en Y

En primer lugar, calcularemos el diámetro apropiado en función de momento flector máximo que deberá soportar el eje guía, este será producido por el peso total de la estructura del eje X, ya calculado que es de  $W_y = 46,176 \text{ N}$ . Teniendo en consideración este, se obtuvo como momento flector máximo  $40992 \text{ N} \cdot \text{mm}$ .

De acuerdo a Budynas y Nisbett [9] el factor de seguridad apropiado para el transporte guiado de una herramienta en una máquina pequeña es de 2. Asimismo, se propone utilizar un acero inoxidable SAE 304, debido a que este es el más popular y económico en la industria. El SAE 304 tiene un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_y = 310 \text{ MPa}$ .

Teniendo en cuenta el factor de seguridad  $N=2$ , el máximo esfuerzo permisible será de:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{310}{2} \rightarrow \sigma_{max} = 105 \text{ MPa}$$

Por resistencia de materiales, en una sección circular, la relación entre el momento de inercia, el momento flector y esfuerzo será:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} y}{I}$$

Donde R es el radio de la sección circular:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} R}{\frac{\pi}{4} R^4}$$

Reemplazando y despejando el radio R:

$$105 \frac{N}{mm^2} = \frac{(40992 N \cdot mm)}{\frac{\pi}{4} R^3}$$

$$R = 7.92 \text{ mm} \rightarrow D = 15.84 \text{ mm}$$

Se toma una medida comercial ofrecida en el mercado local, por ejemplo, por Aceros Arequipa de 5/8 de pulgada, esto es 15.9 mm.

Así las guías cilíndricas en el eje X tendrán un diámetro de 15.9 mm y también un largo de 1500 mm.

### 3.2-5 Diseño del tornillo de precisión en Y

Al igual que para el diseño del tornillo de precisión del eje X, será necesario en una primera instancia asumir un material de trabajo. Basado en el hecho que también se pretende seleccionar un tornillo de precisión ofrecido del fabricante SKF, serie SDS/BDS/SHS (ver catálogo en Anexos). Los diámetros ofrecidos oscilan entre 6 mm y 16 mm, de esta manera si al finalizar los cálculos obtenemos un diámetro menor a 16 mm y mayor a 6 mm, lo asumido estará correcto. Estos son de acero inoxidable similar al AISI 420, con un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$ . De acuerdo a Budynas y Nisbett [9] el factor de seguridad apropiado para el transporte de una herramienta en una máquina pequeña es de hasta 3 ( $N=3$ ).

Nuevamente, el esfuerzo máximo permisible será de:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{345}{3} \rightarrow \sigma_{max} = 115 \text{ MPa}$$

Teniendo en cuenta  $W_y = 46,176 \text{ N}$ , peso total de la estructura del eje X, que debe soportar en su totalidad en el peor de los casos, el tornillo de precisión del eje Y. Con el paquete de Autodesk Inventor se obtuvo como momento flector máximo de  $12750 \text{ N} \cdot \text{mm}$ .

Por resistencia de materiales, en una sección circular, la relación entre el momento de inercia, el momento flector y esfuerzo será:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} y}{I}$$

Donde R es el radio de la sección circular:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} R}{\frac{\pi}{4} R^4}$$

Reemplazando y despejando el radio R:

$$115 \frac{N}{mm^2} = \frac{(12750 N \cdot mm)}{\frac{\pi}{4} R^3}$$

$$R = 5.2 \text{ mm} \rightarrow D = 10.4 \text{ mm}$$

El diámetro calculado se encuentra en el rango esperado y también es posible seleccionar el tornillo de precisión SDS/BDS 12x2 R del fabricante SKF. Con una densidad lineal de masa de 0,67 kg/m, una densidad lineal de inercia de 10 kg mm<sup>2</sup> / m, un paso de 2mm y una longitud máxima de 2000 mm (ver catálogo en Anexos).

### 3.2-6 Cálculo de inercia neta – Cálculo del torque de motores

Para hacer el cálculo de la inercia neta del sistema a vencer por los motores y con ello poder calcular el torque de estos y seleccionarlos, existen varias metodologías de cálculo, nosotros nos basaremos en la publicación [8] en la cual realizan este mismo cálculo para una cortadora láser también, además de llevar a cabo la implementación y probar que la metodología aplicada es correcta.

Entonces según [8], primero se expresa la inercia estática total como la suma de la inercia del conjunto es decir “la mesa”, el tornillo de precisión y el motor mismo:

$$J_{estaticototal} = J_{mesa} + r * (J_{tornillodeprecisión} + J_{motor})$$

Donde la inercia de la mesa es:

$$J_{mesa} = \frac{m \left( \frac{P_h}{2\pi} \right)^2 * 10^{-6}}{n_p}$$

Donde:

$m$ : masa total de la mesa

$P_h$ : paso del tornillo de precisión

$n_p$ : eficiencia práctica

$r$ : relación de transmisión

Asumiendo que las máquinas CNC tiene un rendimiento del 90%

$$n_p = n_t * 0.9$$

Donde:  $n_t$  : eficiencia teórica y es igual a:

$$n_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi d_\phi}{P_h} * u_c}$$

Donde:  $u_c = 0,006$  coeficiente típico de fricción del husillo de bolas

Así  $n_t$ :

$$n_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi(12)}{2} * 0,006}$$

$$n_t = 0,898$$

Entonces:

$$n_p = 0,898 * 0,9$$

$$n_p = 0,809$$

Así, la inercia de la mesa será de:

$$J_{\text{mesa}} = \frac{5,5 \text{ kg} \left( \frac{2 \text{ mm}}{2\pi} \right)^2 * 10^{-6}}{0,809}$$

$$J_{\text{mesa}} = 6,888 * 10^{-13} \text{ kg} * \text{m}^2$$

La inercia del tornillo de precisión la podemos calcular directamente de los datos del fabricante (a diferencia de [8]):

Según SKF, la densidad lineal de inercia es de  $10 \text{ kg mm}^2 / \text{m}$

$$J_{\text{tornillodeprecisión}} = 1,5 \text{ m} * \frac{10 \text{ kg} * \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$J_{\text{tornillodeprecisión}} = 15 \text{ kg} * \text{mm}^2 = 15 * 10^{-6} \text{ kg} * \text{m}^2$$



La inercia del rotor de un motor de pasos se asume como:

$$J_{motor} = 0,83 * 10^{-4} (kg * m^2)$$

Así la inercia estática total será de:

$$J_{estaticototal} = 6,888 * 10^{-13} + 1 * (15 * 10^{-6} + 0,83 * 10^{-4})$$

$$J_{estaticototal} = 9,8 * 10^{-5} (kg * m^2)$$

Ahora, el torque total ( $T_{total}$ ) está dado por:

$$T_{total} = r * T_e + T_d$$

Donde:

$T_e$ : torque estático

$T_d$ : torque dinámico

$r$ : relación de transmisión

El torque estático viene dado por:

$$T_e = T_{pr} + T_L + T_{rod}$$

Donde:

$T_{pr} = 0$  (Par de precarga, tornillo de precisión y tuerca – ver catálogo en Anexos)

$T_L$ : Torque que deberá soportar el motor debido a la carga

$T_{rod}$ : 0,13 N \* m (Par de fricción rodamientos de apoyo)

El torque que soportará el motor  $T_L$ , viene dado por:

$$T_L = \frac{F_A * P_h * 10^{-3}}{2\pi * n_p}$$

Donde:

$F_A$  = Carga axial soportada por el tornillo de precisión

$P_h$ : paso del tornillo de precisión

$n_p$ : eficiencia práctica

La carga axial  $F_A$  viene dada por:

$$F_A = F_L + u_s (F_V + F_P)$$

Donde:

$F_L = 0$  (carga en dirección del eje del tornillo soportada por la mes – fuerza de corte  
– no existe debido al mecanismo láser)

$F_V = W_y = 46,176 \text{ N}$  (carga vertical soportada por la mesa  
– peso estructural ya hallado en la sección 3.2 – 4)

$F_P = 0$  (carga en dirección perpendicular al movimiento soportada por la mesa)

$u_s =$  coeficiente de fricción entre carros de ejes X o Y de bronce y guías de SAE304

Así  $F_A$  es igual a:

$$F_A = 0 + 0,15 (46,176 + 0)$$

$$F_A = 6,9264 \text{ N}$$

Ahora si es posible calcular el valor de  $T_L$ :

$$T_L = \frac{(6,9264) * (2 * 10^{-3}) * 10^{-3}}{2\pi * (0,809)}$$

$$T_L = 2,73 * 10^{-6} \text{ N * mm}$$

Con ello es posible obtener el torque estático:

$$T_e = (0) + (2,73 * 10^{-6}) + 0,13$$

$$T_e = 0,13 \text{ N * m}$$

Ahora se calcula el torque dinámico, en base a:

$$T_D = \alpha * J_{estaticototal}$$

Donde:

$T_d$ : Torque dinámico del motor

$\alpha$  : Aceleración angular del motor

Así:

$$T_D = (2829 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2}) * (9,8 * 10^{-5} (\text{kg} * \text{m}^2))$$

$$T_D = 0,28 \text{ N * m}$$

Entonces el torque total será de:

$$T_{total} = r * T_e + T_d$$

$$T_{total} = (1) * (0,13) + 0,28$$

$$T_{total} = 0,41 N * m$$

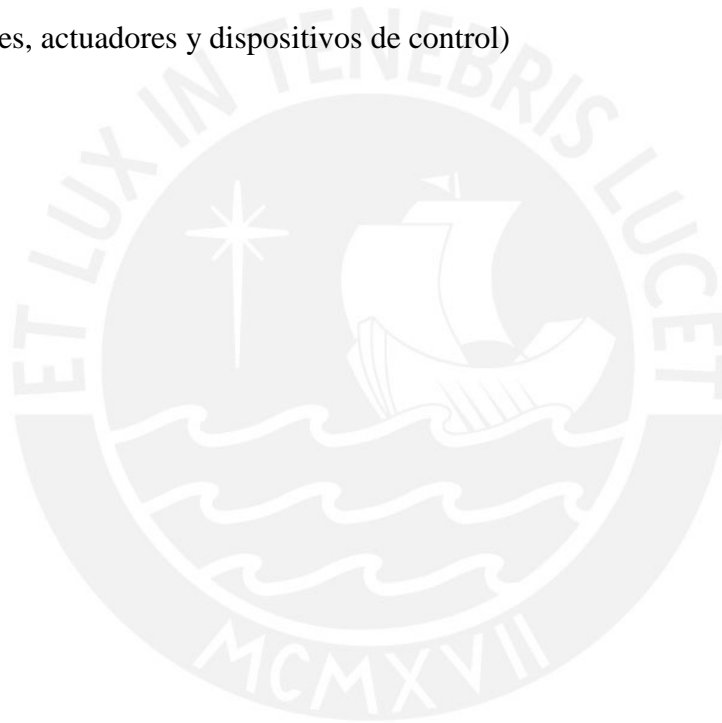
Ya que el propósito principal de la máquina a diseñar es que sea confiable, precisa y sobretodo de bajo costo de mantenimiento, es importante asegurar la vida útil de los motores de paso por ello, se toma un factor de seguridad  $n = 2$ , así se tendrá:

$$T_{motor} = T_{total} * n$$

$$T_{motor} = (0,41) * 2$$

$$T_{motor} = 0,82 N * m$$

Con el torque hallado, se seleccionarán los motores en la sección correspondiente (ver 3.3.2 Selección de sensores, actuadores y dispositivos de control)



### 3.3 Diseño Electrónico

En esta sección se diseñara los circuitos electrónicos, se seleccionarán los componentes que los integrarán y se analizará su funcionamiento, de tal forma que estos garanticen robustez y eficiencia como intermediarios entre el mecanismo y algoritmo de control.

#### 3.3.1 Diagrama de bloques del circuito electrónico

En la Fig. 3.3.1-1 se observa el diagrama de bloques del circuito electrónico. El circuito de regulación consta de tres circuitos análogos que energizan a los dos motores con 24 [V] cada uno, al tubo láser con 30 [V] y el contacto de 5 [V] con los sensores. La tarjeta principal de control, Arduino UNO, se alimenta con 5V directamente por medio del puerto USB.

El computador envía datos (puerto USB) al Arduino que dan a conocer la PFL (posición final del láser) y su velocidad. El sensor de contacto, ubicado en el marco de la puerta de la cabina de corte, indica la apertura o no apertura de esta misma y envía (cortocircuita) 5 [V] al Arduino. El Arduino alimenta con 5 [V] las compuertas lógicas del circuito seleccionador de pulsos que son tres (3) por cada uno y envía dos (2) bits para la selección de la secuencia de pasos (sentido de giro). Los circuitos seleccionadores de pulsos son dos, uno por motor y contienen los optocopladores que sirven para el aislamiento de la parte electrónica y la parte de potencia. Estos envían una señal por hilo del motor, siendo dos motores de cuatro (4) hilos cada uno, es decir cuatro (4) señales por motor.

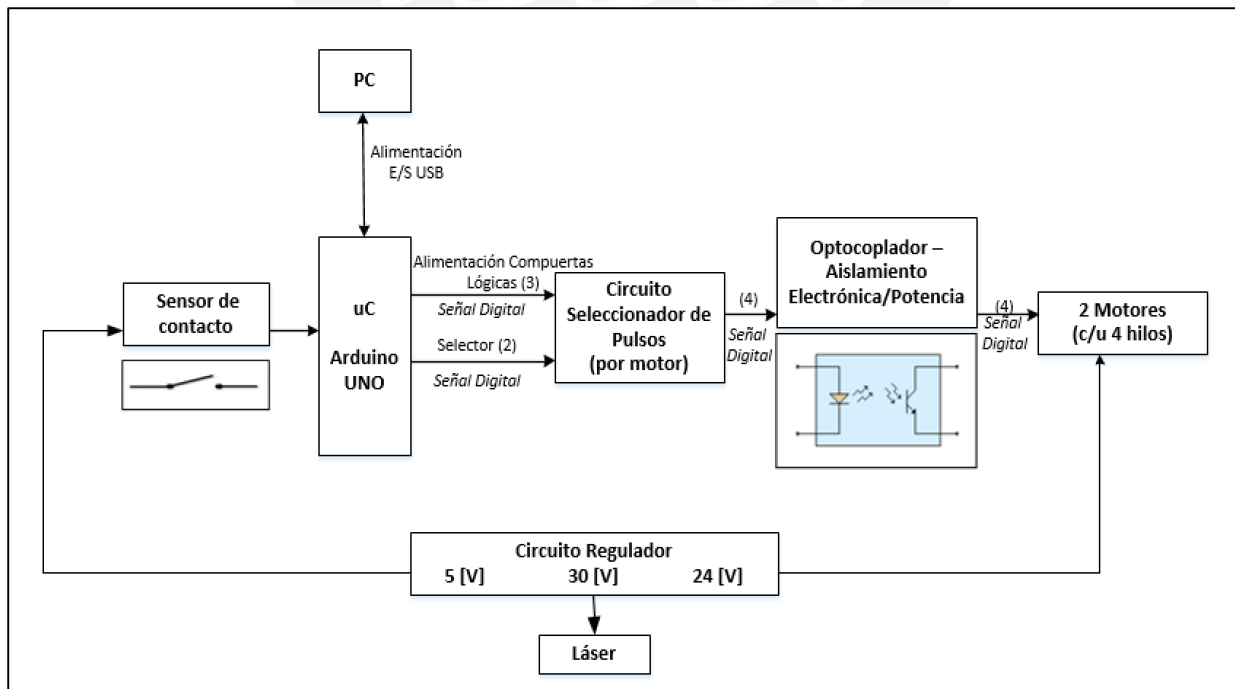


Fig. 3.3.1-1 Diagrama de bloques del circuito electrónico

### 3.3.2 Selección de Sensores, Actuadores y Dispositivos de Control

#### 3.3.2-1 Sensores de Contacto – Microswitch

En total se utilizarán tres sensores de contacto, uno de ellos será resistente a altas temperaturas (hasta 85°C) y su función será detectar si la puerta de la cabina se encuentra abierta o cerrada, con ello se tomará la decisión de deshabilitar el láser o no. Se ubicará en el marco de la puerta y podría tener que soportar calor residual de los gases de corte, a pesar que estos deberían ser evacuados por el ventilador, sin embargo se toma como medida de seguridad para garantizar el funcionamiento correcto de la máquina. Es del fabricante OMRON Corporation, serie SS y modelo “heat resistant” SS-01-T (ver Anexos). Para su funcionamiento requiere un mínimo de 5 VDC 1 mA y es capaz de soportar hasta 1 A. Consta de tres terminales: COM para el nodo de voltaje, NC normalmente cerrado y NO normalmente abierto.



Fig. 3.3.2-1.1 Sensor de Contacto SS-01-T

Los otros dos sensores de contacto se encontrarán ubicados (ver Fig. 3.2-3 y Fig. 3.2-5) en los extremos de los ejes roscados (eje X e Y) y serán activados por el contacto de los carros (X o Y). Su función será garantizar que la posición final del láser (PFL) al inicio de la operación de la máquina sea una esquina (en lógica de control a tratarse como “Posición inicial”). También son del fabricante OMRON Corporation, serie SS y modelo “standard” SS-01GL (ver Anexos). Para su funcionamiento requiere un mínimo de 5 VDC 1mA y es capaz de soportar hasta 1 A. Consta de tres terminales: COM para el nodo de voltaje, NC normalmente cerrado y NO normalmente abierto.



Fig. 3.3.2-1.2 Sensor de Contacto SS-01GL

### 3.3.2-2 Actuadores – Motores de paso

En base al cálculo realizado en la sección 3.2-6 Cálculo de inercia neta - Cálculo del torque de motores, con un torque mínimo requerido de  $0,82 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Seleccionamos los motores de paso para los ejes X e Y del fabricante National Instruments, NEMA 23 número de parte 780079-01(Ver Anexos). Este motor es de dos fases con 0,4 A por cada una, cuatro hilos y ofrece un torque máximo de  $1.27 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Con una resolución de  $1.8^\circ$  por paso y una precisión de  $\pm 3\%$



Fig. 3.3.2-2.1 Motor de paso NEMA23 de National Instruments

### 3.3.2-3 Dispositivos de Control – Tarjeta Arduino UNO

El Arduino UNO es una tarjeta basada en el microcontrolador ATmega 328 (Ver Anexos), por ello debe tenerse en cuenta que al consultar datos de corrientes o voltajes utilizaremos la hoja de datos del ATmega 328. El Arduino UNO tiene 14 pines digitales de entrada/salida que trabajan con una corriente de 40 mA (6 de los cuales pueden ser usados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un puerto para energizar y un botón de reseteo. Además, utiliza un ATmega16U2 programado como convertidor de USB a serial.



Fig. 3.3.2-3.1 Tarjeta Arduino UNO

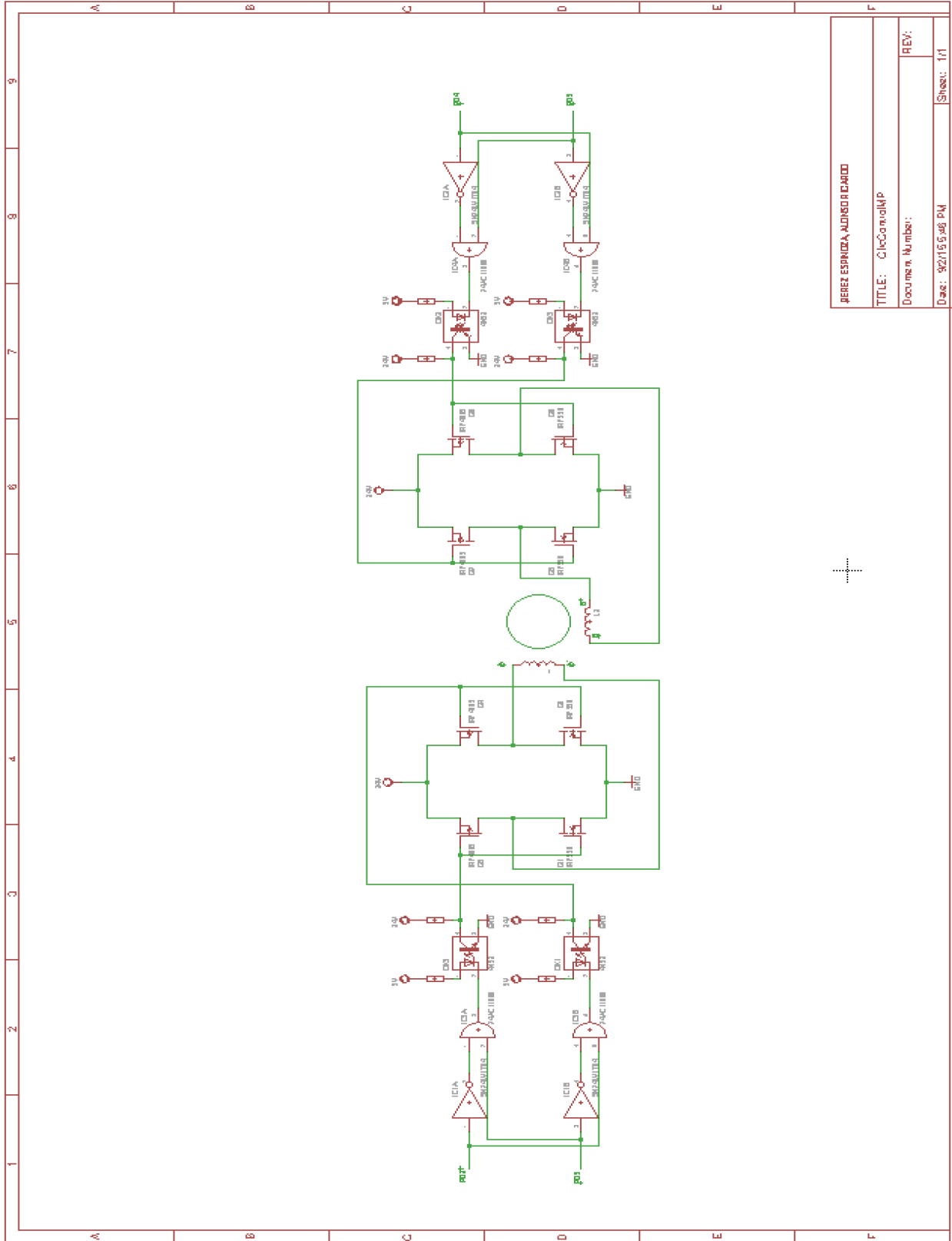


### 3.3.3 Esquemáticos y cálculos de los circuitos electrónicos

#### 3.3.3-1 Esquemático General

En Fig. 3.3.3-1.1 se muestra el esquemático general (son dos circuitos idénticos, uno para el motor del eje X y otro para el motor del eje Y), este contiene el circuito seleccionador de pulsos (uno por fase del motor), acoplado a la etapa de aislamiento de lógica/potencia y esta se encuentra acoplada al controlador (driver) del motor de dos fases NEMA 23, que en este caso no es más que un Puente H por fase.





PEREZ ESPINOZA, ANDRÉS RICARDO
TITLE: CHeControlMP
Document Number:
Date: 9/27/15 5:48 PM
REV:
Sheet: 1/1

Fig. 3.3.3-1.1 Esquemático General (por motor)

### 3.3.3-2 Esquemático circuito seleccionador de pulsos

En Fig. 3.3.3-2.1 se muestra el esquemático del circuito seleccionador de pulsos, el cual consta de dos compuertas lógicas inversoras y dos compuertas lógicas AND. Estas son del tipo CMOS y no TTL, ya que consumen muy poca corriente (despreciable, ver en cálculos), ello implica un menor consumo de potencia, que al final se traduce en un uso eficiente de la potencia entregada al sistema para uso casi exclusivo de los motores. Teniendo en cuenta que esta máquina está siendo diseñada para uso doméstico o de pequeños negocios, se quiere una máquina de bajo costo de operación, bajo consumo energético.

Las entradas al circuito señaladas como PD2 y PD3 son salidas de la tarjeta de control Arduino UNO con valores lógicos de alta 1 (5V) o valores lógicos de baja 0 (0V). Las salidas del circuito ( $X_1$  y  $X_2$ ) accionarán posteriormente los controladores de cada fase del motor (puente H), luego de pasar por una etapa de aislamiento, por ello al calcular los posibles valores que puedan tomar estas salidas ( $X_1$  y  $X_2$ ) es importante tener en cuenta el funcionamiento del puente H.

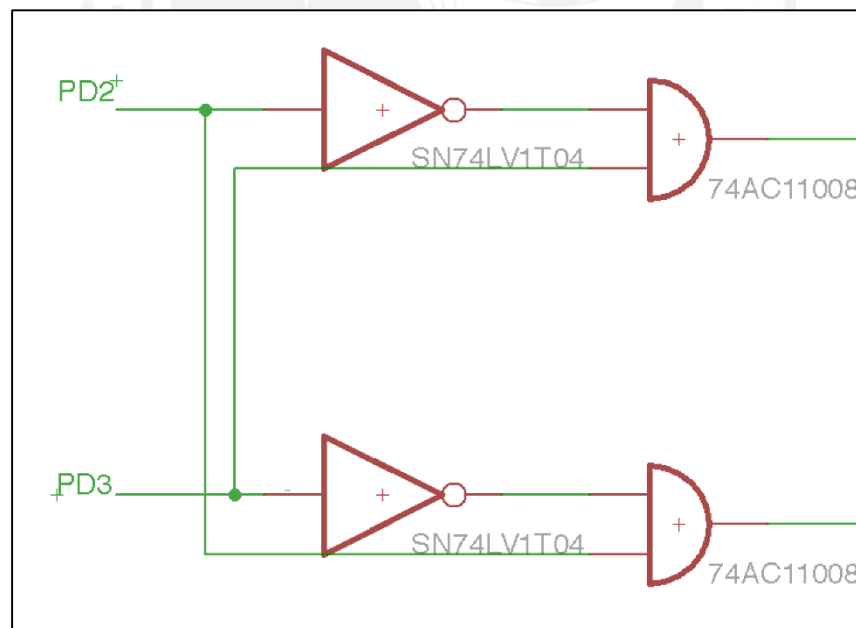


Fig. 3.3.3-2.1 Esquemático del circuito seleccionador de pulsos

### 3.3.3-3 Cálculos del circuito seleccionador de pulsos

Teniendo en cuenta el funcionamiento deseado del puente H para cada fase del motor, se propone la siguiente lógica (ver tabla 3.3.3-3.1):

PD2	PD3	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	
0	0	0	0	
0	1	0	1	
1	0	1	0	
1	1	0	0	Indeseado

Tabla 3.3.3-3.1 Lógica de control

La combinación  $X_1 = 1$  y  $X_2 = 1$  es indeseada ya que dañaría el motor, por ello se define que el valor que tendrán  $X_1$  y  $X_2$  cuando  $PD2 = 1$  y  $PD3 = 1$ , sea  $X_1 = 0$  y  $X_2 = 0$ . Del planteamiento anterior se deduce que la relación lógica entre las entradas y salidas es:

$$X_1 = PD2 \cdot \overline{PD3}$$

$$X_2 = \overline{PD2} \cdot PD3$$

Así se requiere de dos compuertas lógicas inversoras y dos compuertas lógicas AND. Para las primeras, se elige el modelo SN74LV1T04 para utilizar una alimentación  $V_{cc} = 5V$  lo cual da una corriente de 8 mA a la salida en baja o de - 8 mA a la salida en alta. Y requieren de una corriente  $I_I$  (A input) de  $0.12 \mu A$  a una temperatura razonable de  $25^\circ C$ , despreciable en relación a los 40 mA que es capaz de entregar la tarjeta Arduino por un pin I/O.

Para las segundas, se elige el modelo 74AC11008 para utilizar una alimentación  $V_{cc} = 5V$  lo cual da una corriente de 24 mA a la salida en baja o de - 24 mA a la salida en alta. Y requieren de una corriente  $I_I$  de  $\pm 0.1 \mu A$  a una temperatura razonable de  $25^\circ C$ , despreciable en relación a los 40 mA que es capaz de entregar la tarjeta Arduino por un pin I/O o en relación a una salida de la compuerta inversora que puede ser de 8 mA o -8 mA, conectada como entrada a la compuerta AND.

### 3.3.3-4 Esquemático de etapa de aislamiento de lógica/potencia

En Fig. 3.3.3-4.1 se muestra el esquemático de la etapa de aislamiento de lógica/potencia, la cual consta de dos pares de optocopladores y una resistencia. Tiene como función aislar ópticamente la tarjeta de control Arduino y compuertas lógicas que utilizan bajas corrientes y voltajes (baja potencia) de la parte de actuadores en este caso los motores que utilizan mayores corrientes y voltajes (alta potencia), con ello se evita que posibles corrientes de residuales de la parte de alta potencia, puedan deteriorar o destruir los componentes de la parte de baja potencia.

Las entradas al circuito son  $X_1$  y  $X_2$  que son las salidas del circuito seleccionador de pulsos con valores lógicos de alta 1 (ver hoja de datos de 74AC11008) que corresponden a 3.94 V para un  $V_{cc}$  crítico de 4.5 V o valores lógicos de baja 0 (ver hoja de datos de 74AC11008) que corresponden a 0.36 V para un  $V_{cc}$  crítico de 4.5 V. Las salidas del circuito ( $A_1$  y  $A_2$ ) accionarán posteriormente los controladores de cada fase del motor (puente H).

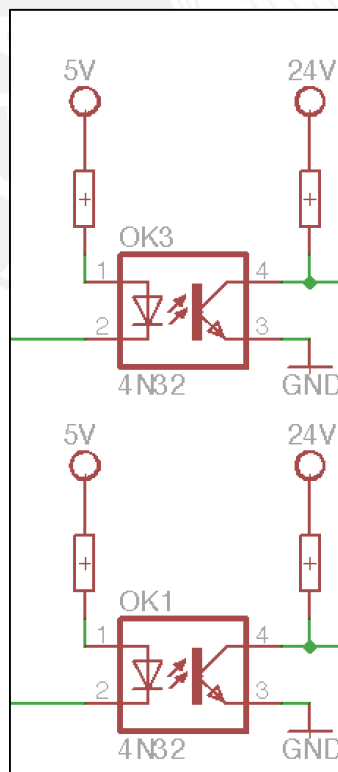


Fig. 3.3.3-4.1 Esquemático de la etapa de aislamiento de lógica/potencia

### 3.3.3-5 Cálculos de etapa de aislamiento de lógica/potencia

En esta etapa es crítico poder garantizar que los optocopladores se accionarán en conducción o en corte, de acuerdo a lo que se pretende a nivel lógico. Es decir, cuando se tenga una entrada de nivel bajo se espera un nivel bajo en la salida y cuando se tenga una entrada de nivel alto se espera un nivel alto en la salida y no puede existir otra posibilidad.

Analizando el primer caso, cuando se tenga una entrada de nivel bajo se espera un nivel bajo en la salida. Para ello el optocoplador deberá estar en conducción, el diodo conducirá corriente y excitará al transistor que conducirá, con lo cual el voltaje de GND = 0V pasará a ser el voltaje de la salida A<sub>1</sub> o A<sub>2</sub> según sea el caso. Teniendo en cuenta que para que el diodo conduzca la corriente I<sub>F</sub> necesaria es 50 mA y el voltaje en sus extremos es de V<sub>F</sub> = 1.25 V (ver hoja de datos de 4N32), se calcula la resistencia necesaria.

En los extremos del diodo:

$$V_{superiordiodo} - V_{inferiordiodo} = 1.25$$

Donde la salida de 74AC11008 en baja es  $V_{inferiordiodo} = 0.36$ , entonces:

$$V_{superiordiodo} = 1.61 V$$

Luego en la resistencia:

$$5 - 1.61 = (50mA) \cdot R$$

$$R = 67.8 \Omega$$

Analizando el segundo caso, cuando se tenga una entrada de nivel alto se espera un nivel alto en la salida. Para ello el optocoplador deberá estar en corte, el diodo no conducirá corriente y no excitará al transistor que estará en corte, con lo cual el voltaje de 24 V superior pasará a ser el voltaje de la salida A<sub>1</sub> o A<sub>2</sub> según sea el caso.

En la resistencia:

$$5 - V_{superiordiodo} = (24mA) \cdot (67.8)$$

$$V_{superiordiodo} = 3.37 V$$



En los extremos del diodo:

$$3.37 - V_{inferiordiodo} = \Delta V$$

Donde  $V_{inferiordiodo} = 3.94 V$  que es la salida de la compuerta 74AC11008 en nivel alto

$$3.37 - 3.94 = -0.57$$

Entonces se verifica que el diodo no conducirá, no excitará al transistor que estará en corte, con lo cual el voltaje de 24 V superior pasará a ser el voltaje de la salida.

Mientras que la resistencia en contacto con los 24 V, será calculada en 3.3.3-7 Cálculos de Controlador (driver) del motor, teniendo en cuenta la corriente de activación necesaria en las puertas (gate) de los MOSFET.



### 3.3.3-6 Esquemático del Controlador (driver) del motor

En Fig. 3.3.3-6.1 se muestra el esquemático del controlador (driver) del motor, el cual consta de dos puentes H, uno por fase. Cada puente H, consta de dos MOSFET canal tipo P (superiores) IRF4905 y dos MOSFET canal tipo N (inferiores) IRF530. Tiene como función controlar el giro del motor de pasos, mediante una secuencia de conmutación, permitiendo que la corriente fluya en una u otra dirección o en ninguna (parada).

Las entradas al circuito son  $A_1$  y  $A_2$  que son las salidas de la etapa de aislamiento de lógica/potencia con valores lógicos de alta 1 que corresponden a 24 V o valores lógicos de baja 0 que corresponden a 0 V. Las salidas del circuito ( $A-A'$  o  $B-B'$ ) son las respectivas fases de un motor.

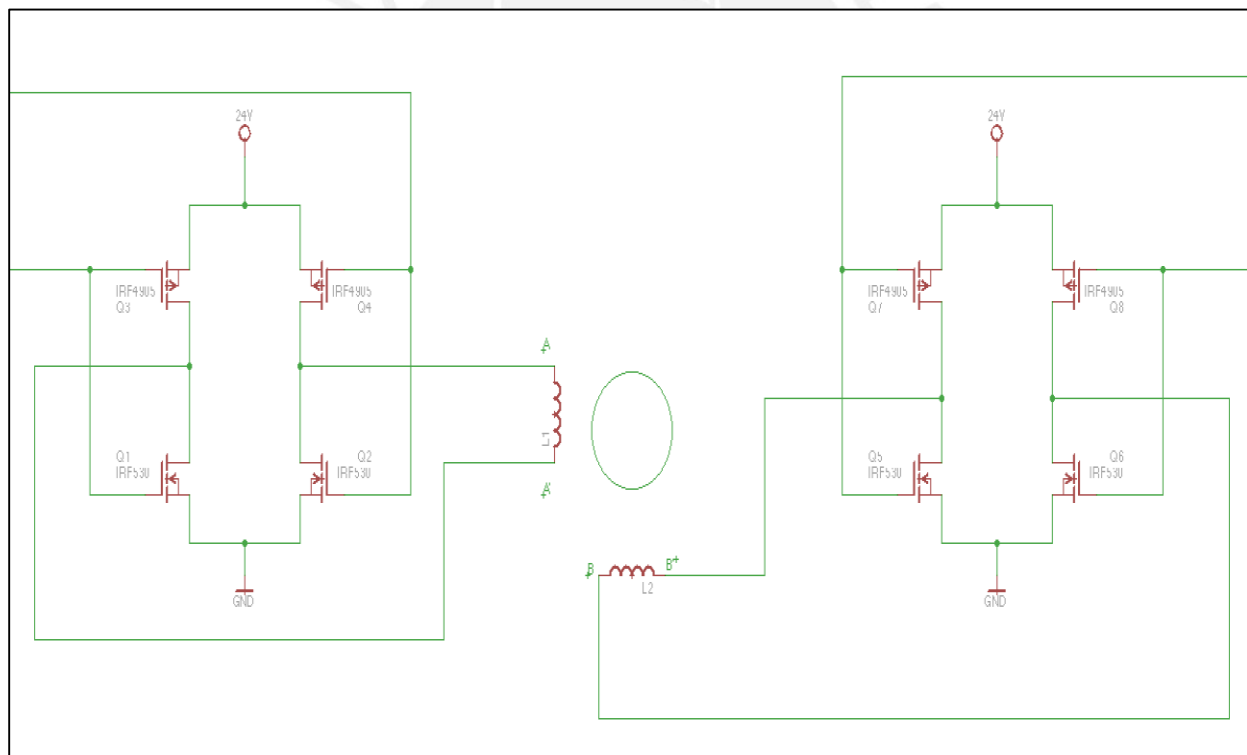


Fig. 3.3.3-6.1 Esquemático del controlador (driver) del motor

### 3.3.3-7 Cálculos del Controlador (driver) del motor

En primer lugar, se calcula la resistencia en contacto con los 24V que quedo pendiente de la etapa de aislamiento de lógica/potencia.

Para el optocoplador con una corriente de fuga máxima de (ver hoja de datos de 4N32 – Collector emitter leakage current) 100 nA, esta corriente existe entre el colector y emisor aun cuando el transistor (salida del optocoplador) no debería estar conduciendo y debería estar abierto. Esto se traduce en una condición, un voltaje cercano a 24V en la puerta (gate) de uno de los MOSFET tipo P, con lo cual el MOSFET no debe conducir entre drenador y surtidor.

El voltaje umbral mínimo  $V_{GS(th)}$  (ver hoja de datos IRF4905) es de -2V. Este es el caso crítico pues se espera que no conduzca y con un mínimo de -2V esto podría suceder.

$$V_{GS(th)} = V_G - 24 = -2$$

$$V_G = 22 V$$

Para la resistencia, con la corriente de fuga (no deseada en este caso):

$$24 - 22 = (100nA) R_{max}$$

$$R_{max} = 20 M\Omega$$

Con un factor de seguridad de N=10, se elige  $R = 2 M\Omega$ .

Ahora analizamos la conducción para un par de MOSFET y el motor.

Los MOSFET canal tipo P tienen un voltaje puerta - surtidor  $V_{GS}$  de -10V y los MOSFET canal tipo N tienen un voltaje puerta - surtidor  $V_{GS}$  de 10V.

El voltaje entrada en la puerta (gate) del MOSFET canal tipo P será:

$$V_{GS(th)} = -10V = V_G - V_S = V_G - 24$$

$$V_G = 14 V$$

El voltaje entrada en la puerta (gate) del MOSFET canal tipo N será:

$$V_{GS(th)} = 10V = V_G - V_S = V_G - 0$$

$$V_G = 10 V$$

Para un MOSFET canal tipo P y un MOSFET canal tipo N en serie, entre los voltajes 24V y tierra 0V, considerando las resistencias entre drenador y surtidor  $R_{DS(on)}$  en conducción se tiene el siguiente voltaje para el motor:

$$24 - 0 = \Delta V_P + \Delta V_{motor} + \Delta V_N$$

$$24 = i_{motor} \cdot R_{DS(on)-P} + \Delta V_{motor} + i_{motor} \cdot R_{DS(on)-N}$$

De la hoja de datos del motor, del gráfico del 780079-01, para una curva de 24 VDC la corriente debe ser de  $i_{motor} = 2.7$  A. Y de la hoja de datos de los MOSFET las resistencias entre drenador y surtidor son  $R_{DS(on)-P} = 0.02\Omega$  y  $R_{DS(on)-N} = 0.16\Omega$

$$24 = (2.7) \cdot (0.02) + \Delta V_{motor} + (2.7) \cdot (0.16)$$

$$\Delta V_{motor} = 23.514 V$$

Con lo cual el motor funcionara sin problemas y proveerá al sistema mecánico el torque esperado.



### 3.4 Diseño de Lógica de Control

En esta sección se establecerá la lógica de control basada en el diseño óptico, mecánico y eléctrico realizado en las secciones anteriores. En primer lugar, se definirá el diagrama de flujo de control principal y luego se detallará también en diagramas de flujo cada función o subrutina pertinente. Posterior a ello, se explicará y analizará los recursos matemáticos o algorítmicos necesarios para que este flujo de control sea capaz de garantizar un funcionamiento robusto y eficiente en diversas situaciones.



### 3.4.1 Diagrama de flujo de control principal

En la figura 3.4.1-1 se muestra el diagrama de flujo de control principal.

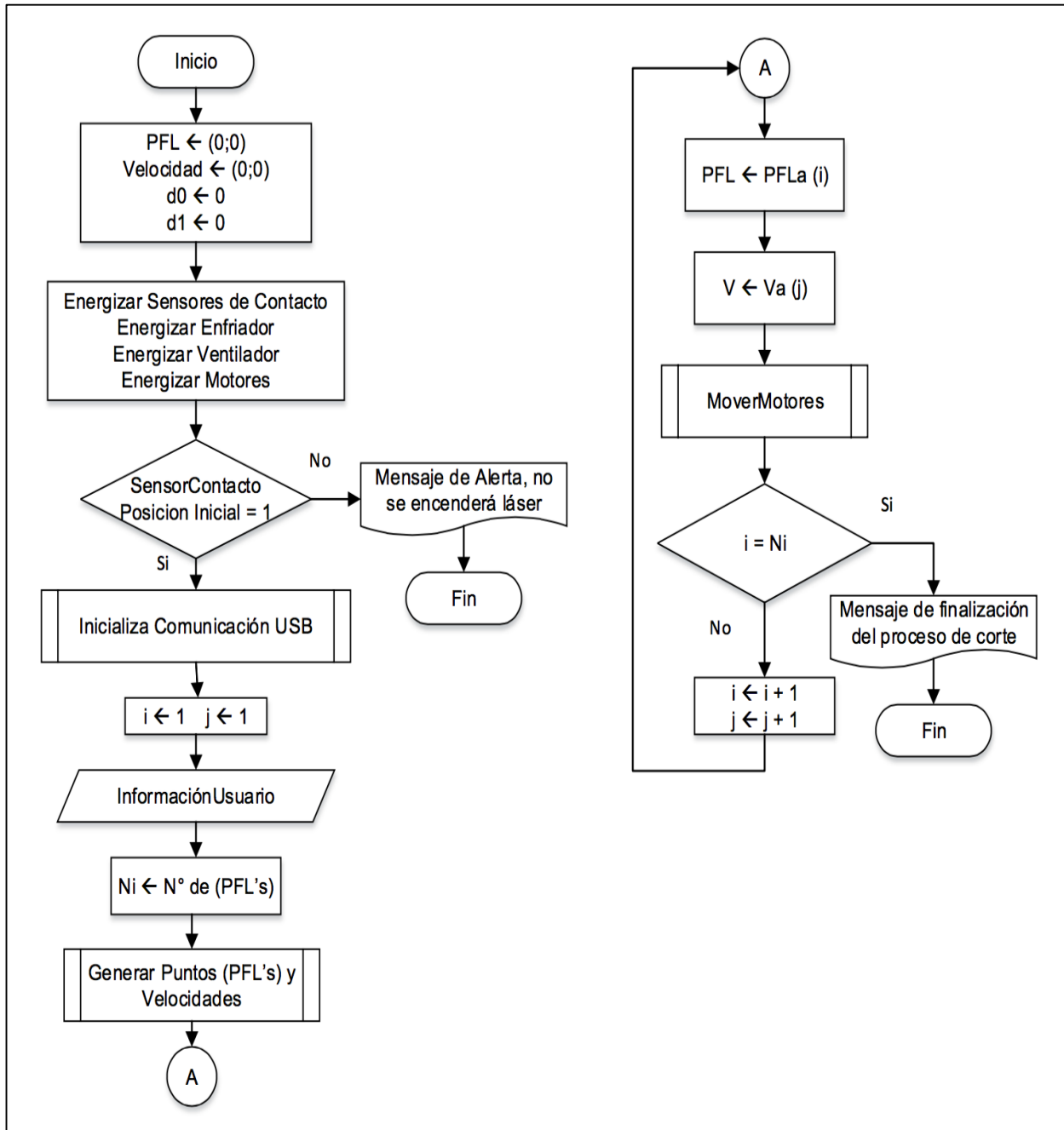


Fig. 3.4.1-1 Diagrama de flujo de control principal



En primer lugar, se inicializan las variables de interés para el corte estas son:

- PFL: Posición Final del Láser, como su nombre lo indica es un punto compuesto de dos coordenadas, X e Y, al cual se posicionará el cabezal que refleja el haz de luz, es decir sobre este punto siempre existirá calor y por ende corte.
- Velocidad: Es un vector de dos componentes, X e Y, válido entre dos PFL. Para definirlo se calculará el vector unitario tangente a una curva formada (esta también se modelará) entre dos PFL (dirección) y se asignará un módulo de velocidad (rapidez) conveniente, el cual depende del espesor (ver sección 3.1.1 Diseño Óptico – Cálculos).
- $d0_x$ ,  $d1_x$ ,  $d0_y$  y  $d1_y$ : Salidas lógicas de la tarjeta de control, toman valores de 1 o 0 y están asignadas a los pines PD2, PD3, PD4 y PD5. Con estas se define la secuencia de pulsos para el motor de paso de cada eje (X e Y).

En este primer bloque es crítico por la seguridad del usuario, posicionar el láser en la “posición inicial”, esta es una esquina aislada en la cual el láser no podrá cortar la materia prima o dañar como posibilidad las manos del usuario si es que este las introdujera en la cabina.

Luego, se energizan todos los sensores de contacto y los demás actuadores, enfriador, ventilador y motores. Sin embargo no se energiza el láser, hasta que se garantice que físicamente que el PFL se encuentre en la posición aislada en mención. Así, en el siguiente bloque se evalúa si el sensor de contacto correspondiente a la posición inicial se encuentra activo, es decir, si el carro que porta el cabezal láser (PFL) está físicamente localizado en la posición aislada de seguridad. Ante las dos posibles opciones 1 (si) o 0 (no), se energiza el láser y se habilita la comunicación para iniciar el corte o se envía un mensaje de alerta no se encenderá láser: “Por su seguridad no se energizará el láser y no podrá cortar. El cabezal láser no encuentra en la posición aislada de seguridad por favor reinicie la máquina, para intentar de forma automática lo anterior. De aparecer nuevamente este mensaje comuníquese con soporte técnico”.

A continuación, se habilita la comunicación USB entre la computadora (usuario ingresa información de corte desde esta) y la tarjeta de control. Dos contadores “i” y “j” son inicializados con el valor 1, más adelante cuando sea pertinente, se explicará la función de estos.

Ahora se lee la información de corte ingresada por el usuario, la cual no es más que un archivo .dwg (nativo de AutoCad) o .cdr (nativo de Corel Draw) y el espesor (th) de la plancha de la

materia prima a cortar. Estos tipos de archivo son de dibujo vectorial, es decir los dibujos realizados están codificados como vectores.

Lo anterior es de gran ayuda para el algoritmo de control desarrollado pues los puntos (x; y) para definir cada vector, ya se encuentran dados de forma explícita como información. En otras palabras, se tienen todos los PFL y es matemáticamente trivial (ver 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos) determinar las ecuaciones de las curvas en coordenadas cartesianas entre dos puntos, consecuentemente el vector tangente unitario, que es la dirección de las velocidades para cada tramo. Este procesamiento mencionado es realizado por la subrutina “Generar Puntos (PFL’s) y Velocidades” (ver 3.4.2-2), que tiene como variables de entrada los PFL del archivo .dwg o .cdr y el espesor de corte. Para esta última variable, se verifica que sea un número mayor a 0 mm y menor a 8 mm, pues de no ser así no cumpliría con la potencia de diseño calculada para el láser (ver sección 3.1.1 Diseño Óptico – Cálculos). Tiene como variables de salida dos arreglos, uno de posiciones finales del láser (PFL<sub>a</sub>) y otro de vectores velocidad (V<sub>a</sub>). Además se asigna a la variable “Ni” el valor del número de puntos finales del láser, que conforman el patrón a cortar.

Ahora se hace uso de los dos contadores “i” y “j” anteriormente mencionados. El contador “i” tiene como función ser el puntero del arreglo de posiciones finales del láser, es decir permitir que a la posición final del láser actual (PFL) con la que se trabaja, se le asignen secuencialmente los valores de los puntos que conforman el patrón a cortar. De forma similar, el contador “j” tiene como función ser el puntero del arreglo de velocidades, es decir permitir que a la velocidad actual (V) con la que se trabaja, se le asignen secuencialmente los valores de las velocidades que permiten describir el patrón a cortar.

Luego la subrutina “MoverMotores” tiene como variable de entrada la velocidad (V) actual, con la cual genera a través de una serie de cálculos (ver 3.4.2-3 Subrutina MoverMotores y 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos) el movimiento de los motores. Esta subrutina no tiene variables de salida, solo realiza la acción mencionada.

Finalmente, haciendo uso del contador “Ni” y “i” se evalúa si se llegó al número de puntos necesarios para obtener el patrón a cortar. De ser afirmativa la evaluación, el programa finaliza con un mensaje de finalización del proceso de corte: “El proceso de corte ha finalizado, porfavor espere un minuto antes de retirar el producto”. De ser negativa la evaluación, se incrementa cada

contador “i” y “j” y se continúa con la iteración, asignando nuevos valores a la posición final del láser actual (PFL) y a la velocidad actual (V).

Además, ante todo el flujo control mencionado existe una subrutina de interrupción. Como su nombre lo indica puede interrumpir el flujo de control en cualquier momento cuando se produce un evento en particular, que en este caso es la apertura de la puerta de la cabina (ver 3.4.2-1 Subrutina de interrupción para puerta de cabina abierta).



### 3.4.2 Diagramas de flujo de subrutinas

#### 3.4.2-1 Subrutina de interrupción para puerta de cabina abierta

En la figura 3.4.2-1.1 se muestra el diagrama de flujo de la subrutina de interrupción para cuando se produce el evento de puerta de la cabina abierta.

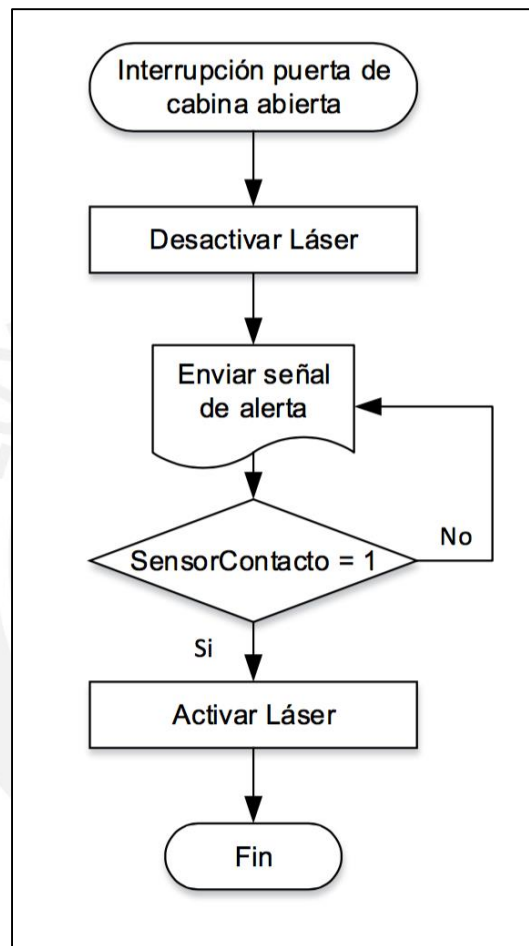


Fig. 3.4.2-1.1 Diagrama de flujo de subrutina de interrupción

Como se mencionó anteriormente, al finalizar 3.4.1, la subrutina en mención interrumpe el flujo de control en cualquier momento cuando se produce un evento en particular, que en este caso es la apertura de la puerta de la cabina. En primer lugar, se desactiva el láser, es decir se corta a través del microcontrolador la energía que lo alimenta, ello por seguridad de que el usuario ingrese sus manos o cualquier objeto extraño y sea dañado por el haz de luz. Luego se envía un mensaje de alerta: “El proceso de corte se ha pausado, la puerta de la cabina se encuentra abierta. Porfavor cierre la puerta para continuar”.

Posterior a ello, se evalúa si efectivamente el usuario cerró la puerta, lo cual a nivel lógico es un “1” del sensor de contacto ya que de cerrarse la puerta esta entrara en contacto con el sensor ubicado en el marco interno.

Si la puerta continua abierta, es decir a nivel lógico se obtiene un “0” del sensor de contacto. Se vuelve a enviar el mensaje de alerta y se mantiene un flujo cerrado hasta obtener un nivel lógico de “1” para el sensor de contacto. Luego, se activa el láser, es decir se habilita a través del microcontrolador la energía que lo alimenta y se finaliza la interrupción, con lo cual el programa principal o flujo de control principal retomará sus acciones en la instancia donde se quedó antes que se produjera la interrupción.



### 3.4.2-2 Subrutina Generar Puntos (PFL's) y Velocidades

En la figura 3.4.2-2.1 se muestra el diagrama de flujo de la subrutina Generar Puntos (PFL's) y Velocidades.

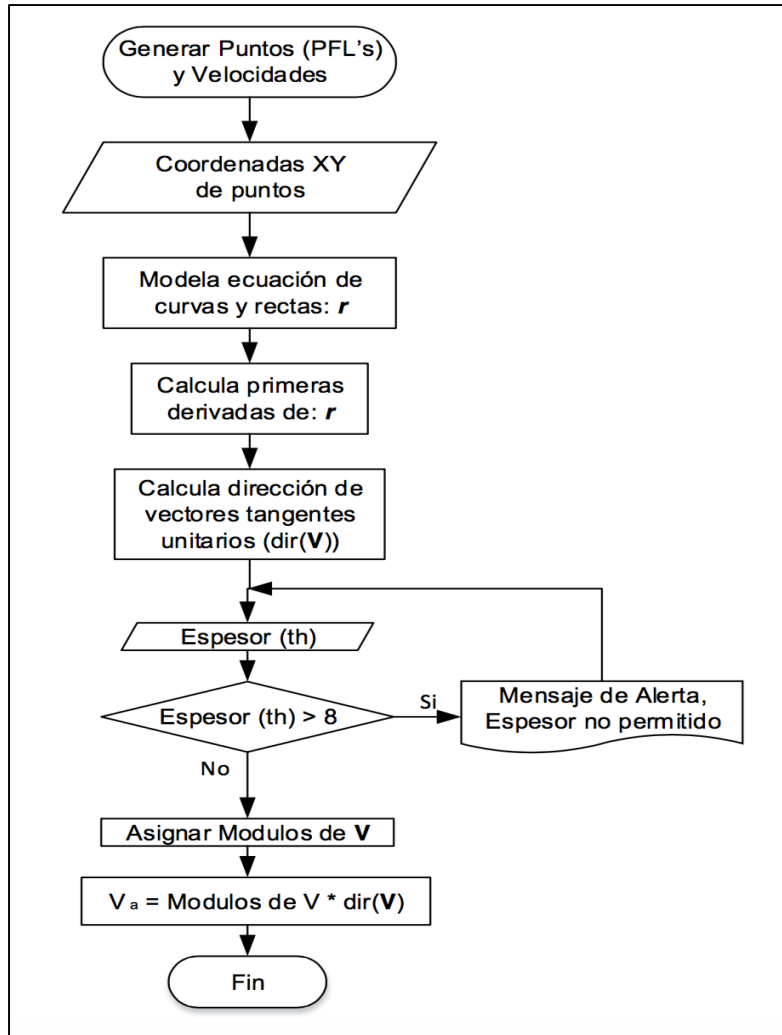


Fig. 3.4.2-2.1 Diagrama de flujo de subrutina Generar Puntos (PFL's) y Velocidades

En primer lugar, se lee una de las variables de entrada para esta subrutina, que son las coordenadas XY de los puntos (PFL's). Como se mencionó anteriormente, estas son información directa de los archivos de dibujo vectorial .dwg o .cdr, ya que en estos programas precisamente el proceso de dibujo para el usuario implica definir un mínimo número de puntos por trayectoria dependiendo del tipo que se desee trazar (para más detalle ver 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos).

Luego, se modela con los puntos obtenidos ecuaciones de curvas y rectas según sea conveniente (ver 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos). Ello se hace precisamente para optar por el siguiente paso, tener ecuaciones cartesianas que sean diferenciables y que permitan por el criterio



de la primera derivada hallar las direcciones tangentes para todo punto de las trayectorias. Con ello se tiene un arreglo de direcciones tangentes para todo punto de cada trayectoria que se desea cortar, esto no es más que las direcciones del vector velocidad que deberá tener el cabezal láser a lo largo del proceso de corte.

Ahora es necesario tener el módulo del vector velocidad, para lo cual se lee la otra variable de entrada la cual ha debido ser ingresada por el usuario en la computadora, el espesor de la plancha de materia prima a cortar. Entonces se evalúa si es un valor numérico que se encuentre entre 0 y 8 mm. De ser negativa la respuesta, se mostrará un mensaje de alerta, de espesor no permitido: “Espesor no permitido, esta máquina solo puede cortar espesores de entre 0 y 8 mm de acrílicos y maderas. No seguir estas consideraciones podría dañar el material de trabajo o producir resultados no esperados. Porfavor ingrese un espesor valido.” y se mantiene un flujo cerrado de lectura del nuevo espesor, evaluación de validez y mensaje de alerta, hasta obtener un espesor válido. De ser positiva la respuesta, se procede a asignar el módulo de velocidad correspondiente para cada tramo, los cuales ya han sido calculados (ver 3.1.1 Diseño Óptico – Cálculos).

Finalmente se multiplica el arreglo de direcciones y el arreglo de módulos, para obtener un arreglo de vectores velocidad ( $V_a$ ) para cada tramo, esta es una de las variables de salida de la subrutina en mención, así como también el arreglo de puntos ( $PFL_a$ ).

### 3.4.2-3 Subrutina MoverMotores

En la figura 3.4.2-3.1 se muestra el diagrama de flujo de la subrutina Generar Puntos (PFL's) y Velocidades

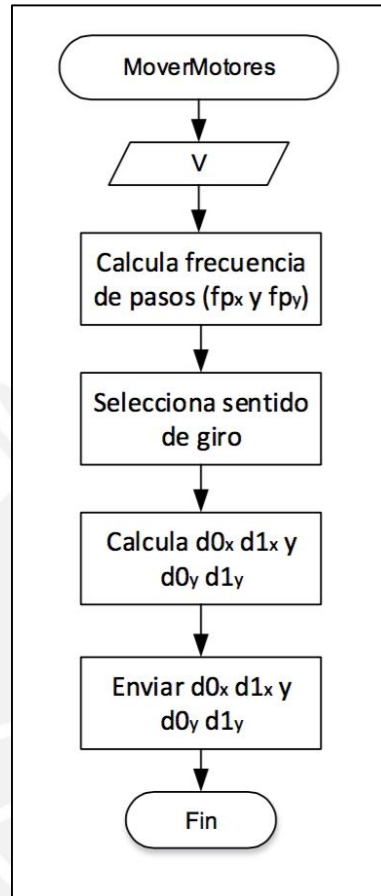


Fig. 3.4.2-3.1 Diagrama de flujo de subrutina MoverMotores

En primer lugar, se lee una de las variables de entrada para esta subrutina, que es la velocidad ( $V$ ) actual. Es importante aclarar que la variable es un vector, una única velocidad para un tramo, no es el arreglo ( $V_a$ ), para ello existe el contador (puntero) ya mencionado “j” que permite extraer del arreglo ( $V_a$ ) cada vector velocidad ( $V_a(j)$ ) y actualizarlo en  $V$  (actual). Es por eso que esta subrutina forma parte de una iteración cerrada, hasta que se concluye el proceso de corte. Luego, se calcula la frecuencia de pasos (ver detalle en 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos), es decir cuantos pasos debe dar el motor por segundo (pasos/seg), ello es de gran importancia para el envío de las señales de control (secuencia) del microcontrolador al circuito seleccionador de pulsos.

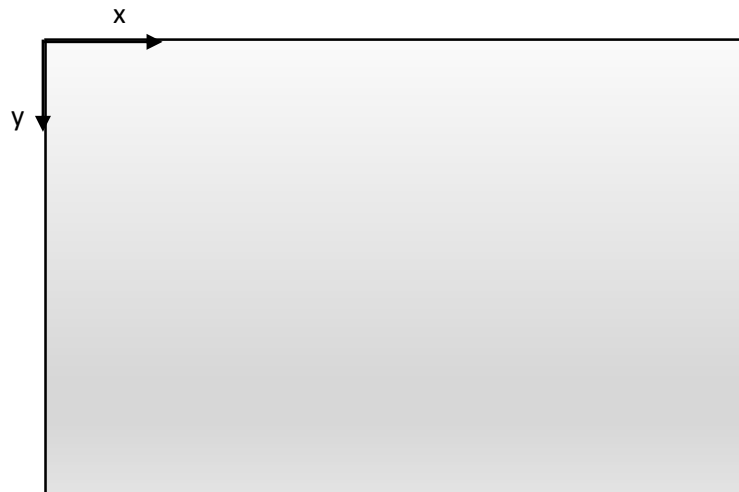
Ahora que se tiene la velocidad de envío requerida, se selecciona el sentido de giro teniendo como criterio la dirección de la velocidad, por ello se calculó antes. Así, se conoce que tan rápido se debe enviar la secuencia de dos bits (control de un motor de pasos de 4 hilos) y en qué orden debe enviarse (sentido de giro). Se calcula y envía la secuencia o señales de control.



### 3.4.3 Recursos matemáticos o algorítmicos

#### 3.4.3-1 Determinación de ecuaciones de curvas

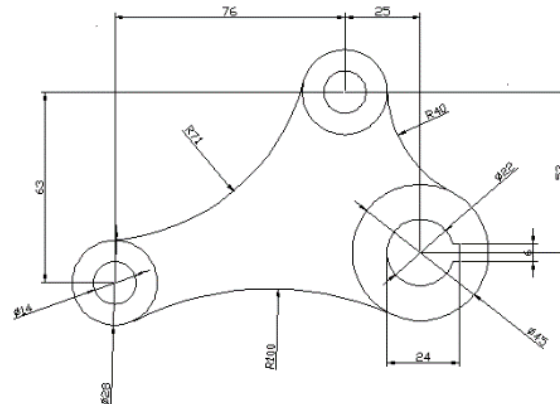
Se utilizará el siguiente sistema de referencia, donde el origen es la posición inicial (posición aislada de seguridad) y el rectángulo representa la mesa de trabajo.



Así como se extraen todos los puntos del archivo .dwg o .cdr, también estos contienen como información cual ha sido la herramienta o comando del programa (sea AutoCAD o Corel Draw respectivamente) con la que se creó un dibujo.

Para ilustrar mejor esta situación tomemos como ejemplo un dibujo hecho en AutoCAD. En apariencia, parece bastante complejo por la forma de las curvas (ver Fig.3.4.3-1.1) pero que resulta ser tan solo circunferencias creadas con el comando “Circle”, algunas para las cuales se ha utilizado la variación “center y radius” (se define en base al centro y al radio) y otras para las

cuales se ha utilizado la variación “tangent-tangent-radius” (se define en base a dos puntos de tangencia y al radio).



[10] Fig.3.4.3-1.1 Dibujo creado en AutoCAD

Para las circunferencias de los extremos que son 3 se utilizó la variación “center y radius”, matemáticamente lo modelaríamos con la ecuación de una circunferencia:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

Donde:

$(x_0; y_0)$  es el centro de la circunferencia

R es el radio de la circunferencia

En esta variación ambas variables son conocidas y ya se tiene la ecuación de la circunferencia. Además, tomar en cuenta que solo el borde exterior es parte del dibujo, es decir solo una parte de la circunferencia será parte del corte, por ello se restringe el dominio. En el caso de que no sea una función como sucede para el borde exterior a cortar de la circunferencia inferior izquierda, se separa por tramos para  $y > 0$  y para  $y < 0$ , ello para poder diferenciar.

En la variación “tangent-tangent-radius” ya no se conoce directamente las variables de la ecuación de la circunferencia pero es posible hallarlas de la siguiente manera:

Si se tiene dos puntos de tangencia  $(x_1; y_1)$ ,  $(x_2; y_2)$  y el radio  $R$ , es posible plantear el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(x_1 - x_o)^2 + (y_1 - y_o)^2 = R^2 \dots (1)$$

$$(x_2 - x_o)^2 + (y_2 - y_o)^2 = R^2 \dots (2)$$

Restando ecuaciones ((1) - (2)):

$$x_1^2 - x_2^2 - 2x_1x_o + 2x_2x_o + y_1^2 - y_2^2 - 2y_1y_o + 2y_2y_o = 0$$

Acomodando términos:

$$(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2) + (x_2 - x_1) 2x_o + (y_2 - y_1) 2y_o = 0$$

$$y_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{-(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2) - (x_2 - x_1) 2x_o}{(y_2 - y_1)}$$

Con lo cual se tiene la ordenada del centro  $y_o$  en términos de la abscisa  $x_o$ , reemplazando en (1):

$$(x_1 - x_o)^2 + \left( y_1 - \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{-(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2) - (x_2 - x_1) 2x_o}{(y_2 - y_1)} \right) \right)^2 = R^2$$

Se tiene una ecuación con una incógnita  $x_o$ , es posible hallar su valor para luego reemplazar en (3) y hallar el valor de  $y_o$ . Teniendo nuevamente la ecuación de la circunferencia definida.

Lo mismo es posible para rectas, parábolas o cualquier curva, haciendo uso de geometría analítica, planteando sistemas de ecuaciones, restringiendo el dominio de forma conveniente o definiendo tramos para que una curva sea siempre una función y sea posible diferenciarla.



### 3.4.3-2 Determinación de vector tangente unitario a una curva Dirección del vector velocidad

Sea  $\vec{r}(t) = (x(t); y(t))$  el vector posición medido desde el origen para un tramo determinado, que describe el corte, esta es la trayectoria que deberá seguir el cabezal láser (PFL).

Este se obtiene de parametrizar la ecuación de una curva cualquiera descrita por una función  $f(x)$ , explicado anteriormente.

Tomando  $x = t$ , implica que  $f(x) = f(x(t)) = f(t) = y(t)$

El vector unitario del vector velocidad  $\vec{V}$  viene dado por:

$$\widehat{e}_v = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} = \frac{\frac{\partial \vec{r}}{\partial t}}{\left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \right|} = \frac{(\dot{x}(t); \dot{y}(t))}{\sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{y}(t))^2}}$$

Pero esta expresión aun depende del valor del parámetro  $t$

De acuerdo al espesor ( $th$ ) ya se tiene una rapidez predeterminada (ver 3.1.1 Diseño Óptico – Cálculos), es decir el modulo del vector velocidad  $|\vec{V}|$ . Por lo tanto:

$$(\dot{x}(t))^2 + (\dot{y}(t))^2 = \text{valor conocido que depende de } (th)$$

Ecuación con la cual se conocerá el valor del parámetro  $t$  y por ende  $\widehat{e}_v$  tendrá un valor numérico siempre.

### 3.4.3-3 Cálculo de frecuencia de pasos – Rapidez de envío de señal de control (secuencia) y Orden de secuencia (sentido de giro)

En el diseño que se presenta, la frecuencia de pasos ( $f_p$ ), es la razón entre el número de pasos que debe dar el motor por unidad de tiempo  $\frac{\text{pasos}}{\text{seg}}$  o  $\frac{\text{pasos}}{\text{min}}$  y ello está directamente relacionado al envío de las señales de control (secuencia de dos bits para controlar cada motor de 4 hilos) del microcontrolador al circuito seleccionador de pulsos. Asimismo, el orden de esta secuencia de dos bits afectará el sentido de giro del motor.

Por ejemplo si la última señal enviada es “10” es necesario saber si luego se enviará “11” y se continuara con ”00”, ”01” y así sucesivamente (giro del motor anti horario) o si luego de haber enviado “10” se enviará “01” y continuara con “00”, “11” y así sucesivamente (giro del motor horario).

Como se puede apreciar ambas variables de control son de gran relevancia.

Para determinar la frecuencia de pasos ( $f_p$ ), se parte del hecho de que dado un espesor (th) se tiene una rapidez predeterminada (ver 3.1.1 Diseño Óptico – Cálculos):

$$|\vec{V}| \text{ en } \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \text{ o } \left[ \frac{\text{mm}}{\text{seg}} \right]$$

Esta rapidez, es del desplazamiento lineal del carro en cada eje, entonces es necesario tomar en cuenta la resolución o paso del tornillo de precisión, sobre el cual se desplaza este mismo:

Para el tornillo de precisión SDS/BDS 12x2 R del fabricante SKF (ver catálogo en Anexos):

$$p = 2 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right]$$

Es muy importante notar que esta resolución es de carácter mecánica, del tornillo de precisión y “el paso” se refiere al avance lineal que realiza cuando da una revolución, **no** debe confundirse con la resolución del motor o “un paso” del motor a pasos, que es el ángulo barrido por señal de control recibida.

Continuando, se puede hallar la velocidad angular requerida en el motor:

$$\omega = \frac{|\vec{V}|}{p} = \frac{|\vec{V}|}{2} \rightarrow \omega = \frac{\left[\frac{mm}{seg}\right]}{\left[\frac{mm}{rev}\right]} = \left[\frac{rev}{seg}\right]$$

Ahora para el motor NEMA 23, número de parte 780079-01(ver Anexos) se tiene una resolución equivalente de:

$$\psi = 200 \frac{pasos}{rev}$$

Esto significa que con el envío de 200 señales (200 números de 2 bits) el motor da una revolución completa.

Ahora si relacionamos la velocidad angular requerida en el motor con su respectiva resolución, obtendremos la frecuencia de pasos ( $f_p$ ):

$$f_p = \omega \cdot \psi = \frac{|\vec{V}|}{2} \cdot 200 \rightarrow f_p = \left[\frac{rev}{seg}\right] \cdot \left[\frac{pasos}{rev}\right] = \left[\frac{pasos}{seg}\right]$$

Para determinar el orden de la secuencia (sentido de giro), no es necesario realizar ningún calculo adicional a los ya hechos. Basta analizar el signo de cada componente del vector tangente unitario a la curva de corte, es decir la dirección del vector velocidad.

Tomando en cuenta el sistema de referencia planteado a inicios de 3.4.3

Sea el vector tangente unitario para un tramo de corte:

$$\widehat{e}_v = (\widehat{e}_x; \widehat{e}_y)$$

Si  $\widehat{e}_x > 0$  : En el motor del eje X, sentido de giro anti horario (visto desde el origen) por lo tanto la secuencia deberá ser del tipo: 00, 01, 10, 11, 00, 01, 10, 11, 00, etc.

Si  $\widehat{e}_x < 0$  : En el motor del eje X, sentido de giro horario (visto desde el origen) por lo tanto la secuencia deberá ser del tipo: 00, 11, 10, 01, 00, 11, 10, 01, 00, etc.

Si  $\widehat{e}_y > 0$  : En el motor del eje Y, sentido de giro horario (visto desde el origen) por lo tanto la secuencia deberá ser del tipo: 00, 01, 10, 11, 00, 01, 10, 11, 00, etc.

Si  $\widehat{e}_y < 0$  : En el motor del eje Y, sentido de giro anti horario (visto desde el origen) por lo tanto la secuencia deberá ser del tipo: 00, 11, 10, 01, 00, 11, 10, 01, 00, etc.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES

Se concluye en base a la cotización realizada en el Anexo B, que el objetivo principal, costo de la maquina; producto del diseño realizado, componentes y fabricación es “medianamente satisfactorio”. Para ello se tiene en cuenta que el costo comercial calculado de la máquina diseñada es de \$4900 y el costo mínimo de una cortadora láser comercial en el mercado, con una potencia de corte menor o igual a la diseñada (50 W) incluyendo costos de importación, es de \$6000. En primer lugar, el diseño pretendió y logro reducir costos en cada área posible: óptica (baja potencia del láser), mecánica (materiales de piezas y tornillos de precisión disponibles en el mercado local) y electrónica (diseño óptimo y componentes disponibles en mercado local). En segundo lugar, a lo largo del diseño se optó por factores de seguridad o sobredimensionamiento, coherentes con un uso doméstico y no industrial. A pesar de ello, existen muchos componentes como el láser que no se pueden adquirir en el mercado local y que su importación los encarece hasta en un 25% , el enfriador y motores de paso son casos similares. Asimismo, elementos como la cabina que es indispensable para garantizar la seguridad del usuario, hecha de un material resistente a altas temperaturas, pero costoso y con un proceso de fabricación que por lo menos localmente es aún también bastante costoso. Es importante notar que a pesar que no se aprecia en la cotización del equipo el consumo de energía, es decir el costo de operación, es bastante bajo debido a las consideraciones que se tuvieron con la potencia del láser y el diseño de los circuitos de control que pretendieron optimizar el uso de la corriente de forma casi exclusiva para los motores. Se dice que el cumplimiento del objetivo principal es “medianamente satisfactorio”, ya que a pesar de ciertos costos altos intrínsecos a la máquina (láser y enfriador) o limitaciones locales (disponibilidad de componentes y costos de fabricación), se logró diseñar una cortadora láser de un costo equivalente a las existentes en el mercado pero de mayor capacidad, 800 mm x 500 mm frente 1m x 1m, con componentes de calidad (marcas reconocidas) y precisión (resolución de corte). El costo resulta ser asequible para una empresa o negocio pequeño y para instituciones educativas pero no para un hogar, quizás con su fabricación en volumen esto podría ser posible.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.historialuniversal.com/2010/07/primer-revolucion-industrial.html>
- [2] <http://www.historiacultural.com/2010/07/segunda-revolucion-industrial.html>
- [3] <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=133373>
- [4] Mikell P. Groover,  
2010 *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Fourth Edition. United States of America. John Wiley & Sons
- [5] J. Paulo Davim (Edited by)  
2012 *Lasers in manufacturing*. 1st Edition. Great Britain. ISTE Ltd y John Wiley & Sons
- [6] Dr J. Powell and Dr A. Kaplan, <Edited by Milan Brandt and Erol Harvey> , Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2004  
2004 *LASER CUTTING: FROM FIRST PRINCIPLES TO THE STATE OF THE ART*
- [7] William M. Steen and Jyotirmoy Mazumder,  
2010 *Laser Material Processing*. Fourth Edition. London. Springer-Verlag London. Pp. 156 – 160, 2010.
- [8] Fausto Acuña, Héctor Terán, Santiago Lugmania, Wilson Vásquez, Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga Latacunga, Ecuador  
*Diseño y construcción de un prototipo de cortadora por láser de dióxido de carbono con control numérico computarizado*
- [9] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett (Edited by)  
2011 *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Ninth Edition. United States New York. McGraw-Hill series in mechanical engineering.
- [10] <http://claytonswesite.weebly.com/autocad-projects.html>

- [11] <http://www.maquinscortelaser.es/es/maquinas-laser/componentes-de-maquinas-laser/refrigeradores-para-laser/refrigerador-cw3000ag.html>

