



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL  
DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS  
APLICADAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TORNO PARALELO DE  
CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA EL  
MECANIZADO DE MATERIALES DÚCTILES DE 60 MM DE  
VOLTEO, 300 MM DE RECORRIDO EN EL EJE Z Y UNA  
PRECISIÓN DE 200 MICRAS.**

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

**KURT NICOLÁS GRONER CASTRO**

**DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS PARRA MENA, MSc**

**D. M. Quito,**

**2019**

## DECLARACIÓN

Yo, Nicolás Kurt Groner Castro, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional, y que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por Normativa Institucional vigente.

---

Nicolás Kurt Groner Castro  
C.C: 1716791379

# CERTIFICACIÓN

El docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología Aplicadas Ingeniero Juan Carlos Parra Mena, MSc.

## CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación denominado “Diseño y construcción de un torno paralelo de control numérico computarizado para el mecanizado de materiales dúctiles de 60 mm de volteo, 300 mm de recorrido en el eje z y una precisión de 200 micras”, fue desarrollado por el Sr Nicolás Kurt Groner Castro y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

---

Ing. Juan Carlos Parra Mena

C.C 1802313781

DIRECTOR DEL PROYECTO

## Índice General

CAPÍTULO I	1
1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1. TEMA	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	4
1.4. HIPÓTESIS	4
1.5. TORNOS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO	6
1.5.1. DEFINICIONES.....	6
1.5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TORNOS DE CONTROL NUMÉRICO .	7
1.6. USO EN LA INDUSTRIA DEL TORNO CNC	9
1.7. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LOS TORNOS CNC COMERCIALES	10
1.8. MECANIZADO EN UN TORNO CNC	12
2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	16
2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL USUARIO	16
2.2. ELABORACIÓN DE LA CASA DE LA CALIDAD	20
2.3. DESARROLLO DE LA MATRIZ MORFOLÓGICA	21
2.4. DIAGRAMA FUNCIONAL DE LA LÍNEA DE MECANIZADO	22
2.5. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL ÁMBITO MECÁNICO	23
2.6. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOFTWARE	49
2.7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL	52
CAPÍTULO III	66

3. DISEÑO DEL TORNO DE CONTROL NUMÉRICO	66
3.1. BOSQUEJO DEL PROTOTIPO	66
3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR Y DE COMPONENTES DE LA MÁQUINA	78
3.3. SELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL ELECTRÓNICO	88
3.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ HMI	96
CAPÍTULO IV	99
4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	99
4.1. FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINA Y LA ESTRUCTURA EN GENERAL	99
4.2. ENSAMBLAJE DE LAS PARTES MECÁNICAS Y CALIBRACIÓN DE LOS ELEMENTOS	106
4.3. ACOPLAMIENTO DE MOTORES Y ELEMENTOS ELECTROMECÁNICOS	108
4.4. INSTALACIÓN Y ACOPLAMIENTO DE LA ELECTRÓNICA Y CONTROL	111
4.5. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL	112
4.6. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	114
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125

### **Índice de Figuras**

<b>Figura 1.1.</b> Ejes de motores de puertas automáticas afectados por corrosión. .	2
<b>Figura 1.2.</b> Sinfín del motor destruido debido al desgaste de los bujes de bronce del motor debido a corrosión.....	3
<b>Figura 1.3.</b> Bosquejo del torno de control numérico a realizar.....	5

<b>Figura 1.4.</b> Imagen referencial de un proceso de desbaste exterior, conocido como cilindrado con un inserto de carburo de tungsteno. ....	7
<b>Figura 1.5.</b> Torno CNC de bancada inclinada con torreta automática de cambio rápido. ....	8
<b>Figura 1.6.</b> Torno de control numérico de bancada plana con torreta de cambio rápido. ....	9
<b>Figura 1.7.</b> Torno CNC Haas Automation serie ST-10 .....	10
<b>Figura 1.8.</b> Torno CNC marca Travis modelo TR-2. ....	11
<b>Figura 1.9.</b> Torno CNC marca Pinacho modelo SE-200. ....	11
<b>Figura 1.10.</b> Insertos de carburo de tungsteno para el mecanizado. ....	13
<b>Figura 1.11.</b> Ángulos de afilado de las cuchillas de acero rápido. ....	15
<b>Figura 2.1.</b> Dimensiones generales que caracterizan un torno. ....	16
<b>Figura 2.2.</b> Diferencia entre exactitud y precisión. ....	17
<b>Figura 2.3.</b> Diagrama de flujo del uso de la máquina en modo automático. ....	19
<b>Figura 2.4.</b> Diagrama funcional de la línea de mecanizado del torno. ....	22
<b>Figura 2.5.</b> Planitud en una superficie. ....	24
<b>Figura 2.6.</b> Rollo de acero de 2.5 mm de espesor. ....	25
<b>Figura 2.7.</b> Producción y comercialización de planchas de acero A36. ....	26
<b>Figura 2.8.</b> Husillo de torno comercial. ....	27
<b>Figura 2.9.</b> Caja Norton con soportes en la fundición. ....	30
<b>Figura 2.10.</b> Estructura preliminar del soporte del conjunto del husillo. ....	31
<b>Figura 2.11.</b> Estructura del husillo del torno CNC. ....	32
<b>Figura 2.12.</b> Seguro seeger para exteriores de ejes. ....	33
<b>Figura 2.13.</b> Ejemplo de aplicación de un seguro seeger. ....	33
<b>Figura 2.14.</b> Tipos de rodamientos FAG. ....	34
<b>Figura 2.15.</b> Rodamientos de rodillos cónicos de contacto angular seleccionados. ....	35
<b>Figura 2.16.</b> Acabado posterior al corte por plasma. Nótese el acabado triangular en los contornos. ....	37
<b>Figura 2.17.</b> Cadena sin tensor, con un salto de diente. ....	38
<b>Figura 2.18.</b> Efecto de cordal o de polígono en una cadena. ....	39
<b>Figura 2.19.</b> Poleas para correa tipo A. ....	40
<b>Figura 2.20.</b> Rodamiento lineal con guía rectificada. ....	41
<b>Figura 2.21.</b> Guía lineal rectificada con rodamiento lineal de cara plana. ....	42

<b>Figura 2.22.</b> Guía lineal rectificada HIWIN.....	43
<b>Figura 2.23.</b> Hiwin series HG de 20 milímetros. ....	44
<b>Figura 2.24.</b> Nema 23 escogido como dispositivo electromecánico para el movimiento de los ejes. ....	45
<b>Figura 2.25.</b> Correa dentada como mecanismo de transmisión de potencia. ...	46
<b>Figura 2.26.</b> Juego en los tornillos de potencia. ....	47
<b>Figura 2.27.</b> Uso de un resorte para eliminar el juego en un tornillo de potencia. ....	48
<b>Figura 2.28.</b> Acople de aluminio para unir el motor a pasos con el tornillo de potencia.....	49
<b>Figura 2.29.</b> Pantalla principal CNC para el torneado. ....	50
<b>Figura 2.30.</b> Pantalla principal de Mastercam X7. ....	51
<b>Figura 2.31.</b> Pantalla principal del programa G Code Sender. ....	52
<b>Figura 2.32.</b> Estructura de conexión de la tarjeta Arduino para el control del modo CNC. ....	53
<b>Figura 2.33.</b> Esquema de conexión del modo automático.....	54
<b>Figura 2.34.</b> Esquema de conexión de las tarjetas de control de la máquina con los drivers de los motores.....	55
<b>Figura 2.35.</b> Diagrama de conexión de un motor a pasos con los tres modos de operación.....	56
<b>Figura 2.36.</b> TB6560 controlador de motores a paso. ....	57
<b>Figura 2.37.</b> Esquema básico de control de los motores con dos tarjetas de control. ....	58
<b>Figura 2.38.</b> Relé 110 voltios doble contacto.....	58
<b>Figura 2.39.</b> Bloque de relés de 1 contacto, activación con 5VDC. ....	59
<b>Figura 2.40.</b> Estructura de los motores a paso que se están utilizando en los ejes.....	60
<b>Figura 2.41.</b> Módulo de 4 relés de 1 contacto que sería utilizado para la habilitación de los motores de los ejes.....	60
<b>Figura 2.42.</b> Estructura del mando propuesto.....	61
<b>Figura 2.43.</b> Estructura del HMI para el modo semi automático.....	63
<b>Figura 2.44.</b> HMI Autonics, ideal para el proyecto. ....	64
<b>Figura 2.45.</b> Raspberry Pi 3, posible aplicación como HMI del modo semi automático.....	65

<b>Figura 3.1.</b> Esquema general de la estructura base del torno. ....	67
<b>Figura 3.2.</b> Estructura base del mecanismo de encaje lineal y transmisión de potencia del Eje Z.....	68
<b>Figura 3.3.</b> Dimensiones generales de las guías lineales ensambladas. ....	69
<b>Figura 3.4.</b> Chumacera de piso de media pulgada de diámetro. ....	70
<b>Figura 3.5.</b> Bases de las guías lineales montadas. ....	72
<b>Figura 3.6.</b> Mecanismo de eliminación de juego mecánico para los tornillos de potencia.....	73
<b>Figura 3.7.</b> Montaje finalizado de la máquina. ....	74
<b>Figura 3.8.</b> Montaje de las chumaceras sobre una plancha de acero sujeta a la cara inferior de la base del eje X. ....	75
<b>Figura 3.9.</b> Mecanismo de eliminación de juego mecánico en las chumaceras. ....	76
<b>Figura 3.10.</b> Mecanismo de eliminación de juego en los apoyos.....	77
<b>Figura 3.11.</b> Dimensiones externas del conjunto del husillo. ....	79
<b>Figura 3.12.</b> Juego de velocidades posibles con una velocidad de flecha de 1800 revoluciones por minuto. ....	80
<b>Figura 3.13.</b> Juego de velocidades posibles con una velocidad de flecha de entrada de 3450 revoluciones por minuto. ....	80
<b>Figura 3.14.</b> Gráfica torque - velocidad del motor seleccionado.....	84
<b>Figura 3.15.</b> Gráfica de la fuerza como función de la velocidad y paso.....	88
<b>Figura 3.16.</b> Variador de frecuencia Lapond de 2.2 kW. ....	89
<b>Figura 3.17.</b> Módulo controlador de motores a paso TB6560.....	90
<b>Figura 3.18.</b> Componentes del tablero de control que deben ser ubicados en la parte frontal. ....	91
<b>Figura 3.19.</b> Funcionamiento de una Jaula de Faraday. ....	92
<b>Figura 3.20.</b> Circuito de control anti rebote y manejo de interferencias.....	93
<b>Figura 3.21.</b> Curvas de carga y descarga de un capacitor .....	94
<b>Figura 3.22.</b> Diagrama de flujo de la lógica de programación del HMI. ....	97
<b>Figura 4.1.</b> Diagrama de flujo de la manufactura de la máquina. ....	99
<b>Figura 4.2.</b> Perforación de la bancada para la colocación de las guías lineales. ....	100
<b>Figura 4.3.</b> Montaje de las guías lineales y alineación de las chumaceras. ..	101

<b>Figura 4.4.</b> Contraguado axial conseguido por la colocación de dos rodamientos de contacto angular de bolas colocados opuestos.....	102
Figura 4.5. Fabricación del conjunto del husillo.....	103
<b>Figura 4.6.</b> Fabricación del husillo. ....	103
<b>Figura 4.7.</b> Tornillos de potencia de paso 2 mm fabricados. ....	104
<b>Figura 4.8.</b> Técnica de la luneta móvil, con la que se debió fabricar los tornillos de potencia del torno.....	105
Figura 4.9. Estructura en la que van acopladas las tuercas de los tornillos de potencia.....	105
<b>Figura 4.10.</b> Calibración de paralelismo entre las guías lineales del Eje Z....	106
<b>Figura 4.11.</b> Medición de deformación de la base del Eje X.....	108
<b>Figura 4.12.</b> Mecanismo anti juego para los tornillos de potencia. ....	109
<b>Figura 4.13.</b> Ensamblaje de los mecanismos anti juego de los tornillos.....	110
<b>Figura 4.14.</b> Colocación del motor principal del husillo y alineación del mismo con el conjunto. ....	111
<b>Figura 4.15.</b> Conexión y cableado del tablero de control del torno CNC. ....	112
<b>Figura 4.16.</b> Conexión y cableado del tablero de control del HMI. ....	113
<b>Figura 4.17.</b> Torno CNC finalizado y funcional. ....	114
<b>Figura 4.18.</b> Protocolo de ensayos a realizar para un torno CNC. ....	116
<b>Figura 4.19.</b> Primer protocolo de ensayos realizado. ....	117
<b>Figura 4.20.</b> Primera probeta de pruebas a realizar en el torno. ....	118
<b>Figura 4.21.</b> Dimensiones generales de la pieza a realizar. ....	118
<b>Figura 4.22.</b> Propiedades mecánicas del acero plata con el que se realizará la primera prueba. ....	119
<b>Figura 4.23.</b> Acabado superficial del segundo ensayo realizado sobre un acero bonificado AISI 4340. ....	120
<b>Figura 4.24.</b> Probetas del primer ensayo realizadas en un acero plata.....	121
Figura 4.25. Pieza de prueba referencial mecanizada con el modo CNC en un acero bonificado AISI 4340 y un inserto de carburo de tungsteno. ....	122

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos comparativos de los diferentes tornos CNC disponibles en Ecuador.....	12
---	----

<b>Tabla 2.</b> Uso de la norma ISO 513 para la selección de insertos. ....	13
<b>Tabla 3.</b> Tabla de selección de insertos según ISO 513.....	14
<b>Tabla 4.</b> Tabla de selección de insertos según ISO 513.....	14
<b>Tabla 5.</b> Fuerza generada por un tornillo de potencia cuyo diámetro menor es de 13 milímetros y está en función del paso. ....	86
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la primera prueba realizada con 6 probetas. ....	119

# CAPÍTULO I

## 1. ASPECTOS GENERALES

### 1.1. TEMA

El tema que se plantea en el presente documento escrito es el diseño y construcción de un torno paralelo de control numérico computarizado para el mecanizado de materiales dúctiles de 60 mm de volteo, 300 mm de recorrido en el eje Z y una precisión de 200 micras.

### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de maquinaria de control numérico computarizado CNC ha tenido un notorio avance en las últimas dos décadas [1], desde el año 2000 se ha buscado incrementar considerablemente la precisión de las piezas que se manufacturan por los métodos tradicionales de arranque de viruta. Esto ha llevado a un acelerado desarrollo de nuevos e innovadores sistemas que permitan garantizar mayores precisiones durante el mecanizado, permitiendo fabricar geometrías de mayor complejidad en el menor tiempo posible.

La empresa Garajes a Control Remoto, una empresa establecida en el Ecuador desde hace 40 años, se dedica a la instalación, mantenimiento y reparación de puertas y motores de garaje. Dentro de todo el trayecto de la empresa, siempre han existido proyectos innovadores que exigen la fabricación de mecanismos especiales que puedan desarrollar diversas tareas, dentro de éstos mecanismos existen piezas con geometrías, en la mayoría de los casos, comunes y que pueden ser realizadas sin mayor dificultad en máquinas herramientas convencionales. Sin embargo, al tratarse de proyectos de carácter innovador, la mayoría de las piezas que se deben fabricar son completamente nuevas y deben pasar por una serie de pruebas antes de formar parte del prototipo final.

Aunque en el Ecuador existen múltiples lugares donde se puede realizar el mecanizado o fabricación de las piezas que la empresa requiere, fabricar los elementos con la precisión solicitada suele ser un proceso demasiado costoso como para ser parte de un prototipo. Es por esta precisa razón que la empresa

de Garajes a Control Remoto ha decidido adquirir un torno de control numérico computarizado de escala semi-industrial que le permita fabricar con el menor costo posible todas las piezas requeridas en el día a día de la empresa. Además de utilizar la máquina para la fabricación de piezas especiales en prototipos, también se propone su uso para la fabricación de repuestos de las líneas comerciales de motores ya que suelen ser difíciles de encontrar.

Como un ejemplo particular, una vez que los motores son instalados, se recomienda realizar un mantenimiento preventivo de los mismos por lo menos una vez al año [2]. Pese a que los motores son, en su mayoría, sellados para evitar que ingresen partículas contaminantes o se presente corrosión en los componentes mecánicos. En la mayoría de casos, los clientes no hacen el mantenimiento correctivo recomendado, y es ahí entonces cuando los elementos presentan fallas, los ejes se corroen debido a la falta de lubricación y fallan, principalmente los asientos de los cojinetes son las partes más propensas al fallo ya que tienden a perder el ajuste con el uso y el motor presenta holguras mecánicas que reducen drásticamente la vida útil del mecanismo. Esto se puede observar en la Figura 1. Cuando esto suele ocurrir es necesario cambiar todo el motor, ya que los repuestos son poco comerciales, incurriendo en un alto costo para el cliente final.



**Figura 1.1.** Ejes de motores de puertas automáticas afectados por corrosión.

**Fuente:** personal.

A simple vista parecería ser que la corrosión no es mayor problema en un eje como el de la Figura 1.0; sin embargo, una vez que los rodamientos y bujes de

bronce pierden su ajuste, los motores comienzan a desgastarse hasta quedar inservibles, esto se puede observar en la Figura 1.2.



*Figura 1.2. Sinfin del motor destruido debido al desgaste de los bujes de bronce del motor debido a corrosión.*

*Fuente: personal.*

Es posible que el material con el que están elaborados los ejes no sea el más adecuado para garantizar una vida útil prolongada de los motores, por esta misma razón con el uso del torno CNC este problema puede ser resuelto sin mayor complejidad.

El problema central es: ¿Cómo fabricar las piezas requeridas por la empresa al menor costo?

Pese a que la respuesta más común de esta pregunta sería en un centro de mecanizado, fabricar los ejes, poleas y elementos de máquina es un proceso costoso, por lo que se debe pensar en otra alternativa distinta.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

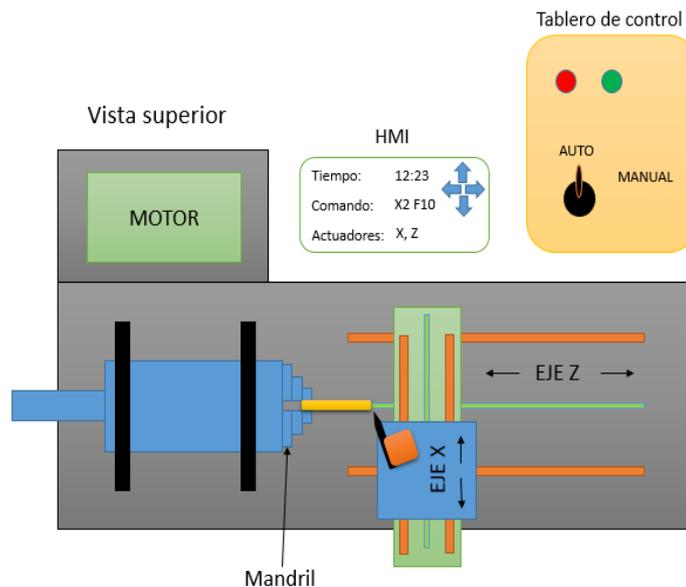
- o Diseñar y construir un torno paralelo de control numérico computarizado para el mecanizado de materiales dúctiles de 60 mm de volteo, 300 mm de recorrido en el eje Z y una precisión de 200 micras.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- o Investigar y documentar las características más relevantes de los tornos paralelos CNC para el mecanizado de materiales de hasta 130HB.
- o Analizar y seleccionar los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos para un torno paralelo.
- o Realizar un diseño que permita utilizar la máquina con varios tipos de materiales como poliamidas, aceros y aluminios.
- o Implementar un sistema que permita controlar la máquina en dos modos, manual y automático, en el manual se podrá controlar los ejes mediante perillas; en el modo automático el torno se controlará por computadora.
- o Fabricar los modelos propuestos a partir de software CAD, generar su código "g" correspondiente y procesarlo mediante un intérprete.
- o Diseñar su tablero de control correspondiente con los indicadores y mandos adecuados según normativas vigentes.
- o Incorporar un HMI para facilitar el control de la máquina y poder visualizar parámetros importantes en tiempo real.
- o Crear una base de datos con los parámetros de mecanizado específicos como avances, profundidad de corte, ángulos de afilado de cuchillas y velocidades de rotación para cada tipo de material que se vaya a mecanizar.

### 1.4. HIPÓTESIS

La propuesta gira en torno al diseño y fabricación de un torno paralelo de control numérico computarizado, capaz de mecanizar sólidos de revolución diseñados en software CAD. La máquina debe mecanizar materiales que tengan una dureza de hasta 130HB, dentro de estos se pueden incluir poliamidas, aluminios y aceros de baja dureza. Se propone que la máquina sea controlada por computador y que pueda ser maniobrada de forma manual para aquellos trabajos que lo ameriten. A continuación, en la Figura 1.3, se puede observar el bosquejo de la máquina a realizar.



**Figura 1.3.** Bosquejo del torno de control numérico a realizar.

*Fuente: personal*

En el diseño se garantizará la seguridad del operario, paros de emergencia y las protecciones que garanticen la funcionalidad y operabilidad de la máquina. Dentro de esta propuesta se utilizará un portaherramientas manual y no se utilizará refrigerante.

Este proyecto presenta múltiples fases, las cuales deben ser correctamente elaboradas, y para que esto sea posible, se debe fundamentar todos los procesos que requieran con la respectiva demostración matemática, haciendo particularmente énfasis en la parte estructural mecánica del elevador. Dado que en muchos de los casos que se presentan en este proyecto se debe realizar una investigación para determinar el procedimiento que se debe tomar, se ha optado de igual forma por hacer hincapié en la posibilidad de contar con el apoyo de los docentes de la Universidad Internacional del Ecuador.

Con este torno se da lugar a la fabricación de geometrías de sólidos de revolución diseñadas por un software CAD. El sólido que ha sido dibujado se exporta a un software CAM el mismo que permitirá configurar todos los parámetros importantes en cuanto a las velocidades de corte, velocidades de avance, profundidad de corte y demás.

En muchos de los casos se requieren realizar mecanizados sencillos con piezas que permitan una baja repetitividad, es importante que la máquina pueda ser controlada manualmente como se realiza usualmente en un torno convencional. Es por esta razón que se incluye dentro del diseño un mando que permitirá desconectar los actuadores del sistema computarizado y controlarlo manualmente.

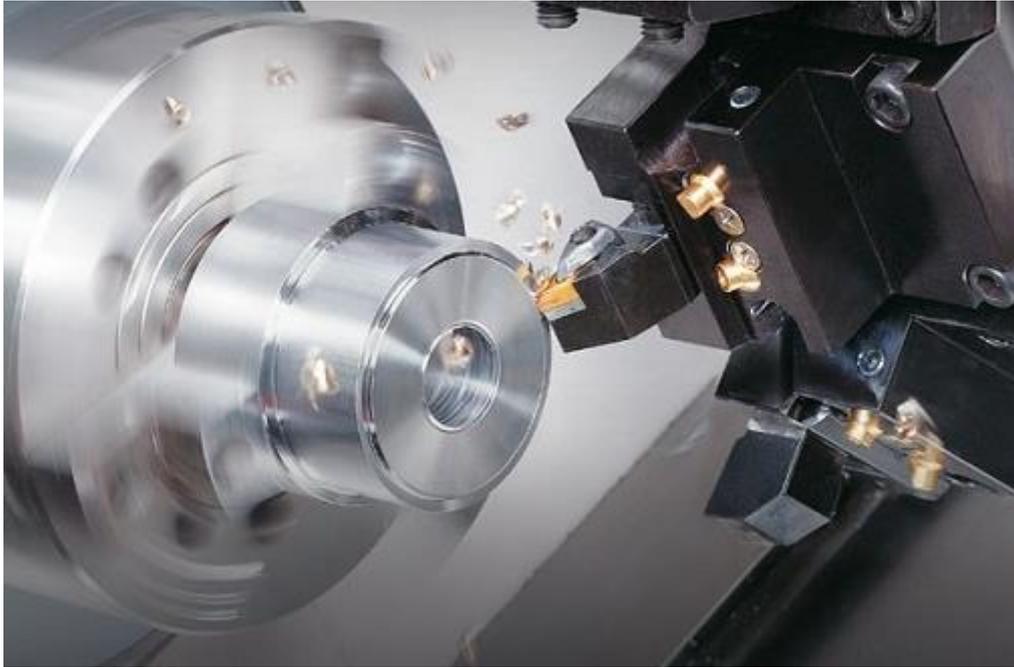
El torno debe tener las protecciones correspondientes para evitar colisiones no deseadas entre los carros móviles y el mandril, para esto se implementa los sensores de posición necesarios en cada uno de los ejes.

## **1.5. TORNOS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**

En este inciso se hace referencia a los tornos de control numérico computarizado que existen en el mercado y son comerciales, con esto, se pretende realizar un estudio sobre las capacidades de las máquinas comerciales para contrastar con los objetivos propuestos.

### **1.5.1. DEFINICIONES**

Un torno de control numérico computarizado es una máquina herramienta muy utilizada en la industria que permite dar forma a sólidos de revolución a través de un proceso de arranque de viruta. Se caracteriza por ser de control numérico ya que el proceso lo realiza de forma automática con la ayuda de un intérprete que es capaz de procesar los comúnmente conocidos “Códigos g” o códigos de máquina [3]. Éstos códigos se generan en un software de manufactura asistida por ordenador CAM, previo a un proceso de diseño en un software CAM, o bien su uso en un solo programa combinado. A continuación, en la Figura 1.4 se muestra una imagen de un proceso común de mecanizado por arranque de viruta.



**Figura 1.4.** Imagen referencial de un proceso de desbaste exterior, conocido como cilindrado con un inserto de carburo de tungsteno.

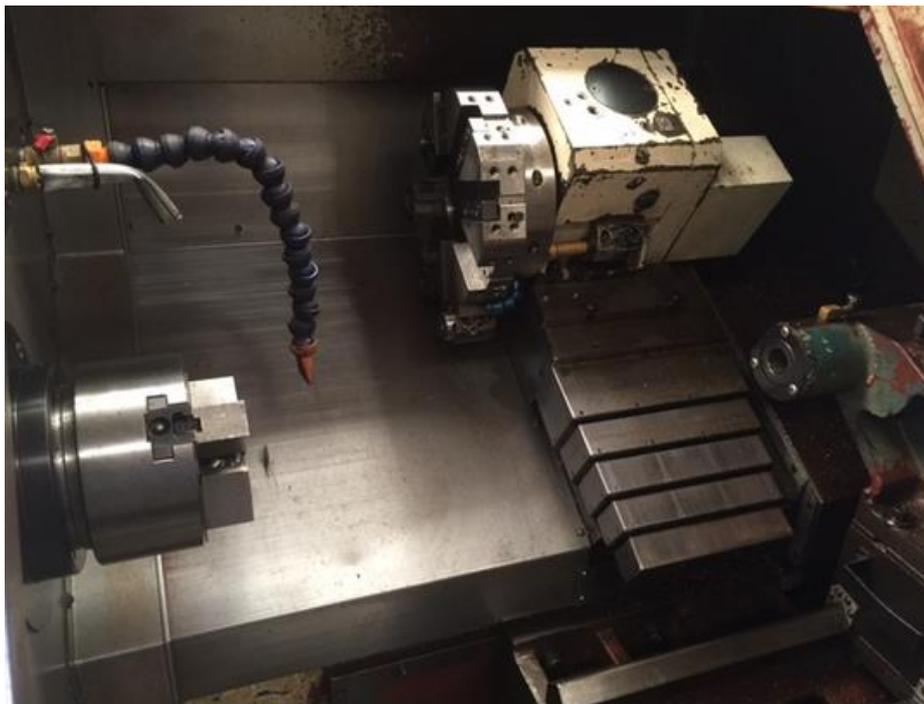
*Fuente:* gestiondecompras.com

### **1.5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TORNOS DE CONTROL NUMÉRICO**

En el mercado existen gran cantidad de tipos diferentes de máquinas de control numérico y particularmente de tornos CNC. A continuación, se realiza una breve descripción de la clasificación de estas máquinas herramientas.

#### a) Torno CNC de bancada inclinada

Este tipo de tornos poseen la bancada del eje de movimiento transversal colocada con una inclinación, ver Figura 5, mediante la colocación de la bancada inclinada, se pretende incrementar la rigidez de la máquina durante el proceso de mecanizado además de incrementar la vida útil de la máquina en general [4].



**Figura 1.5.** Torno CNC de bancada inclinada con torreta automática de cambio rápido.

**Fuente:** [riquemaq.com/venta](http://riquemaq.com/venta)

#### b) Torno CNC de bancada plana

Este tipo máquinas herramientas se caracterizan por tener la bancada donde se sitúa el eje transversal en posición plana, paralela al suelo, este tipo de tornos son muy comunes cuando se habla de máquinas herramientas convencionales y en caso de ser de control numérico es más común observar este tipo de máquinas en trabajos grandes ya que la fabricación de la bancada es más económica [1]. Un torno de estas características se puede observar en la Figura 1.6.

Según el portal “De Máquinas y herramientas”, los tornos que son de control numérico por lo general suelen tener la bancada inclinada, eso les permite obtener una mayor rigidez al momento del mecanizado, sin embargo, la fabricación de este tipo de maquinaria es más costosa. Para los tornos manuales es más común observar tornos de bancada plana por la facilidad que éste genera al desplazar los carros móviles, esto es algo que no sucede con un torno de bancada inclinada, pues para mover sus carros, se debe generar mayor torque en un sentido [16].



*Figura 1.6. Torno de control numérico de bancada plana con torreta de cambio rápido.*

*Fuente: famasa.com*

## **1.6. USO EN LA INDUSTRIA DEL TORNO CNC**

El uso de máquinas herramientas convencionales es una práctica que se viene realizando desde hace varias décadas atrás, en el siglo XVII los tornos ya eran ampliamente utilizados en la industria para la fabricación de diferentes piezas de precisión, sin embargo, la aparición del control numérico computarizado indudablemente dio un giro inesperado a toda la industria de manufactura [5]. El desarrollo de maquinaria de control numérico computarizado tiene fuertes ventajas que comienzan desde el incremento de la productividad, aumento de la precisión y rapidez con la que trabaja la máquina y sobre todo la flexibilidad de adaptación a la fabricación de geometrías que serían realmente complejas de fabricar en máquinas herramientas convencionales. El uso del torno CNC en la industria tiene un amplio uso en la fabricación de sólidos de revolución, ejes para motores, cigüeñales y una amplia variedad de piezas [6]. Cabe destacar que de la misma forma que tiene sus ventajas, los tornos de control numérico también presentan sus desventajas, dentro de éstas las más importantes son:

- Este tipo de maquinaria requiere indispensablemente de personal que tenga conocimiento en el tema o previa capacitación.

- Los accesorios, piezas y partes de las máquinas de control numérico son mucho más costosas en comparación con las máquinas herramientas tradicionales.
- En términos de costos, para compensar la inversión que implica un torno de control numérico su uso debe ser bien planificado de forma que la inversión pueda ser recuperada, esto último, considerando que en el Ecuador los tornos de control numérico superan los USD \$20,000.00 [7].

### 1.7. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LOS TORNOS CNC COMERCIALES

Sin lugar a dudas, uno de los aspectos más relevantes de los tornos de control numérico son los parámetros técnicos en cuanto a capacidad de producción, dentro del Ecuador, existen múltiples proveedores de máquinas de control numérico computarizado, a continuación, se muestran algunos ejemplares que están en venta dentro del país para tomar como referencia en cuanto a especificaciones técnicas.

Dentro de la marca Haas Automation, la serie de tornos de control numérico más básica es la ST-10, ver Figura 1.7, posteriormente en la Tabla 1 se realiza una comparación en cuanto a características técnicas de las máquinas herramientas mostradas en las Figuras 1.7, 1.8 y 1.9.



*Figura 1.7. Torno CNC Haas Automation serie ST-10*

*Fuente: [int.haascnc.com/mt\\_spec1](http://int.haascnc.com/mt_spec1)*

En la marca Travis, se muestra el torno CNC más básico en la Figura 1.8.



**Figura 1.8.** Torno CNC marca Travis modelo TR-2.

**Fuente:** [traviscnc.com/spa](http://traviscnc.com/spa)

Finalmente, en la marca Pinacho, muy reconocida por ser un antiguo fabricante de tornos convencionales de proveniencia española se selecciona su torno CNC de prestaciones básicas modelo SE200, ver Figura 1.9.



**Figura 1.9.** Torno CNC marca Pinacho modelo SE-200.

**Fuente:** [pinacholathescnc.com/es/se-200/](http://pinacholathescnc.com/es/se-200/)

A continuación, se muestra en la Tabla 1.1 una comparativa con los datos característicos de las máquinas herramientas que se han mencionado anteriormente.

**Tabla 1.** Datos comparativos de los diferentes tornos CNC disponibles en Ecuador.

Características	Pinacho SE - 200	Travis TR - 2	Pinacho SE - 202
Distancia entre centros [mm]	750	1800	406
Máximo diámetro de volteo [mm]	200	630	165
Rango de velocidad de rotación del mandril [r.p.m.]	40 - 2800	124 - 2250	0 - 6000
Avances de trabajo [mm/min]	0 - 5000	0 - 5000	0 - 7000
Precisión [mm]	0.01	0.01	0.01
Potencia motor principal [kW]	4.0	11.19	11.2
Alto [mm]	1670	-	1842
Ancho [mm]	1115	2500	1880
Largo [mm]	2250	4700	3200
Peso [kg]	1050	3700	2800

Fuente: [int.haascnc.com/mt\\_spec1](http://int.haascnc.com/mt_spec1) - [traviscnc.com/spa](http://traviscnc.com/spa) - [pinacholathescnc.com/es/se-200/](http://pinacholathescnc.com/es/se-200/)

## 1.8. MECANIZADO EN UN TORNO CNC

El proceso de mecanizado en torno de control numérico, al igual que en un torno convencional utiliza herramientas de corte o herramientas de arranque de viruta, la diferencia que existe entre las dos es que la cuchilla de acero rápido se debe afilar de forma que permita realizar cortes en el material, a diferencia de su contraparte, los insertos, los cuales se diseñan con extremos no tan afilados y permiten arrancar la viruta del material dejando un mejor acabado superficial [8]. Por lo general, se suelen utilizar cuchillas de acero rápido o insertos de carburo de tungsteno, éstos últimos son pequeñas placas que se adquieren en las principales tiendas de distribución de herramientas para el mecanizado, en la Figura 10 se puede observar un inserto de carburo.

Es muy común observar que en los tornos de control numérico se utilicen insertos de carburo, esto se debe a que todos tienen dimensiones estándar y características casi idénticas, facilitando considerablemente la programación de la máquina y la producción en serie de las piezas [12].



**Figura 1.10.** Insertos de carburo de tungsteno para el mecanizado.

**Fuente:** sandvik.com.es

Para el uso de los insertos se debe tener a la mano la norma ISO 1832, la misma que permite caracterizar los insertos dependiendo del uso que se les vaya a dar, se utilizan 10 categorías para su distribución [9].

Por otra parte, para identificar el inserto a utilizar en función del material, se utiliza la norma ISO 513 la misma que establece lo mostrado en las Tablas 1.2, 1.3 y 1.4.

**Tabla 2.** Uso de la norma ISO 513 para la selección de insertos.

Clasificación y Color	Material del inserto	Material recomendado de la pieza	Aplicaciones y generalidades
P: AZUL	Acero al carbono	Acero, acero fundido y acero maleable de viruta larga	Torneado y mandrinado en procesos de acabado, altas velocidades de corte, sección de viruta pequeña, alta calidad superficial, tolerancia pequeña y libre de vibraciones
			Torneado de copiado a altas velocidades de corte, sección de viruta de pequeña a mediana
			Torneado de copiado, velocidad de corte mediana, sección de viruta mediana, refrentados ligeros y condiciones medianamente desfavorables.
			Torneado a velocidades de corte entre mediana y baja, sección de viruta de mediana a grande, incluyendo operaciones en condiciones desfavorables.
			Torneado, ranurado y tronzado a baja velocidad de corte, amplia sección de viruta, posibles ángulos de desprendimiento elevados y condiciones de trabajo muy desfavorables.
			Donde se requiera una gran tenacidad de la herramienta en torneado, ranurado, tronzado a baja velocidad de corte, sección de viruta grande, posibilidad de grandes ángulos de desprendimiento y condiciones de trabajo extremadamente desfavorables

**Fuente:** demaquinasyherramientas.com

**Tabla 3.** Tabla de selección de insertos según ISO 513.

Clasificación y Color	Material recomendado de la pieza	Aplicaciones y generalidades
<b>M: AMARILLO</b>	Acero inoxidable	Acero inoxidable ferrítico y martensítico
		Acero fundido
		Acero al manganeso
		Fundición aleada
		Fundición maleable
		Acero de fácil mecanización

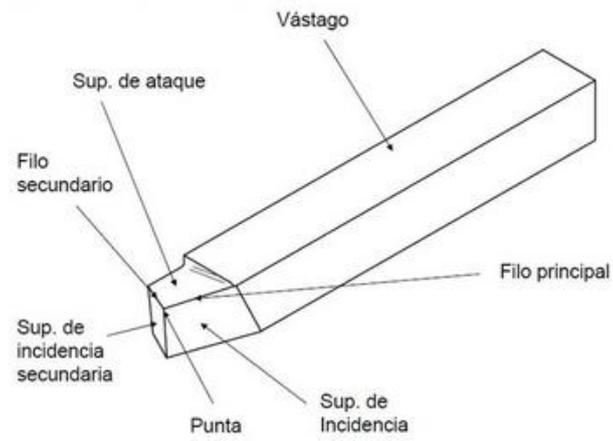
Fuente: demaquinasyherramientas.com

**Tabla 4.** Tabla de selección de insertos según ISO 513.

Clasificación y Color	Material del inserto	Material recomendado de la pieza	Aplicaciones y generalidades
<b>K: ROJO</b>	Fundición	Fundición gris, fundición maleable de viruta corta	Torneado y mandrinado en procesos de acabado.
			Torneado, taladrado, mandrinado etc.
			Torneado, mandrinado y brochado. Además de operaciones que requieran de una herramienta muy tenaz.
			Torneado, tronzado y ranurado en condiciones de trabajo desfavorables y con posibilidades de grandes ángulos de desprendimiento.
			Torneado, ranurado y tronzado en condiciones de trabajo muy desfavorables y con posibilidades de ángulos de desprendimiento muy grandes.
<b>N: VERDE</b>	Materiales no ferrosos	Aleaciones de aluminio, cobre y sus aleaciones	Son metales más blandos, se puede obtener alta velocidad de corte y prolongada vida útil de la herramienta con insertos de fillos agudos.
<b>S: MARRÓN</b>	Aleaciones termo resistentes	Titanio y sus aleaciones, base de hierro, de níquel y de cobalto	Son pastosos, crean filo de aportación, se endurecen durante el mecanizado (endurecimiento mecánico) y generan calor. Son similares a los del área ISO M, pero mucho más difíciles de mecanizar y acortan la vida útil de la herramienta y del filo del inserto.
<b>H: GRIS</b>	Acero endurecido	Acero extra duro y acero templado	La alta dureza hace que todos estos materiales sean difíciles de mecanizar; generan bastante calor durante el mecanizado y resultan muy abrasivos para el filo.

Fuente: demaquinasyherramientas.com

Por otra parte, se puede hacer uso de cuchillas de acero rápido, donde se debe prestar especial atención a los ángulos de afilado, ver Figura 1.11.



**Figura 1.11.** Ángulos de afilado de las cuchillas de acero rápido.

**Fuente:** [demaquinasyherramientas.com](http://demaquinasyherramientas.com)

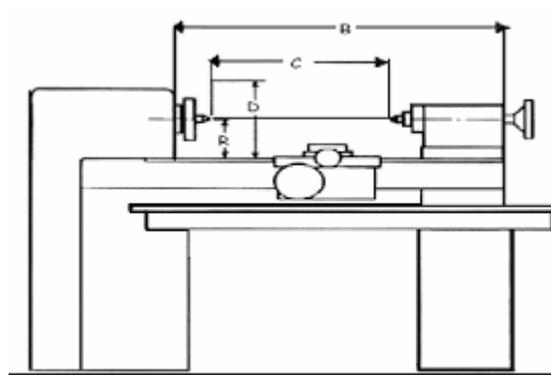
## CAPÍTULO II

### 2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

#### 2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL USUARIO

Efectivamente para el desarrollo de esta máquina se debe tener en cuenta que existen múltiples requerimientos por parte del usuario, entre estos se destacan dimensiones generales de la pieza que se pretende mecanizar, que, para el caso del torno, eso es más específicamente conocido como volteo, para el caso de esta máquina se requiere un volteo de 60 milímetros.

En la Figura 2.1 se pueden observar las distintas dimensiones que caracterizan un torno:



*Figura 2.1. Dimensiones generales que caracterizan un torno.*

*Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería*

De la figura anterior, notar que:

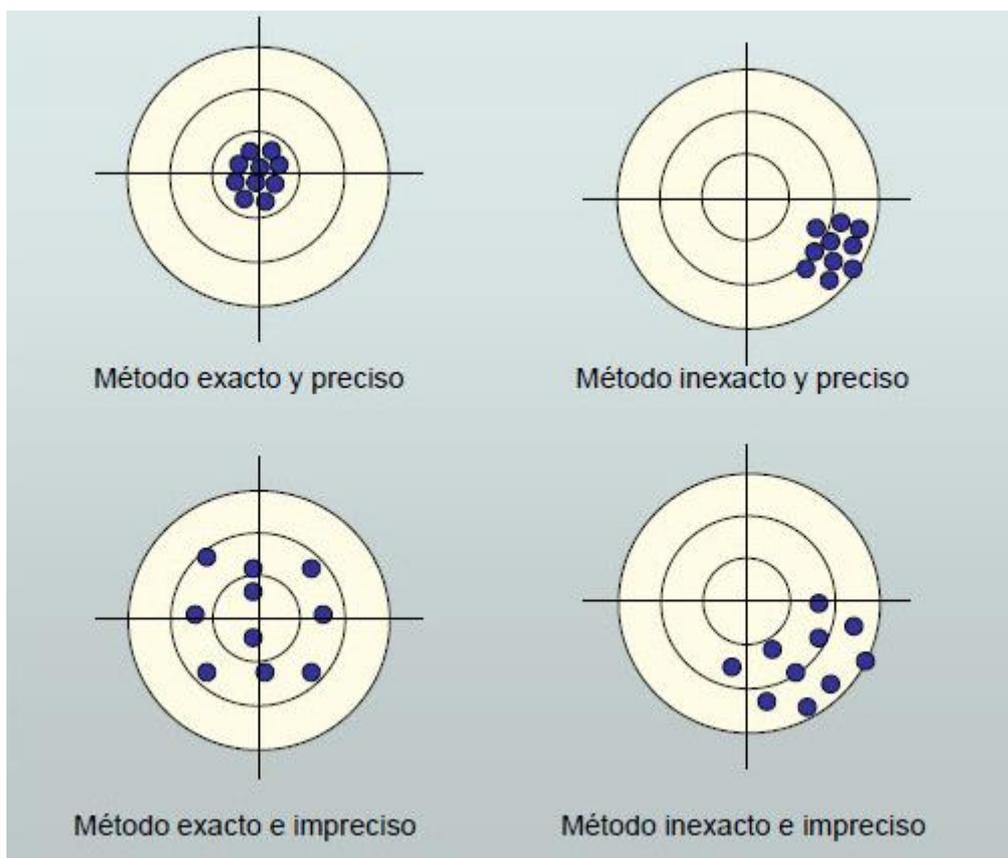
- R: es el radio de volteo máximo.
- D: es el diámetro máximo de volteo.
- C: es la distancia entre puntos.
- R: es el recorrido máximo de bancada.

Para el caso del diámetro de volteo, la dimensión representativa viene a ser la descrita como "D". Notar que, si el diámetro de volteo requerido es de 60 mm, consecuentemente el radio de volteo debería ser de 30 mm, sin embargo, se

debe agregar un margen adicional que permita garantizar que cuando el material esté sujeto al mandril, pueda girar libremente y con total seguridad.

Otra medida requerida es la longitud de trabajo en el Eje Z, este eje representa – por lo general – el eje de mayor recorrido en un torno, es decir, el eje longitudinal. Se requiere que este eje tenga al menos 300 mm de recorrido, para esto, y con base en lo mostrado en la Figura 2.1, si se requiere un desplazamiento longitudinal de 300 mm, la distancia entre puntos, indicada como “C” en la imagen, deberá ser superior en al menos el tamaño de todo el eje X.

Finalmente, se requiere que la máquina tenga una precisión de 200 micras, este es un punto fundamental que determinará muchos factores de la máquina. En primera instancia, se debe recordar cuál es la definición de precisión, para esto se puede observar la figura 2.2 [3]:



**Figura 2.2.** Diferencia entre exactitud y precisión.

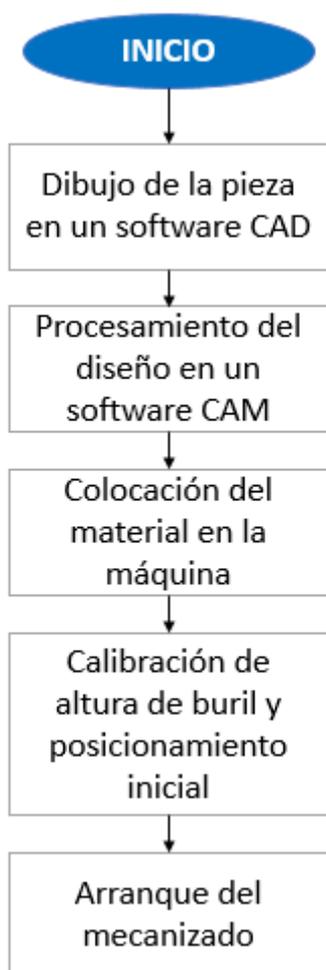
**Fuente:** Escuela Colombiana de Ingeniería

Eventualmente, aquí hay dos conceptos muy diferentes, el primero la exactitud y el segundo la precisión. Para ambos casos, se considerará que la desviación máxima es de 200 micras.

Esta precisión debe ser alcanzada tanto en medidas longitudinales como transversales, razón por la que, para poder alcanzar este valor se deberán realizar múltiples estudios que permitan garantizar que la máquina y sus mecanismos de traslación acumulen la menor cantidad de juego mecánico entre inversión de movimientos.

Por la parte del control de la máquina, se requiere que ésta tenga 2 modos de operación: uno manual y uno automático. Para el modo manual la máquina debe tener un desenganche electrónico de los motores, esto quiere decir, que los motores se mantienen físicamente aplicado a los mecanismos de transmisión de potencia, pero están electrónicamente desconectados, por lo que, al girarlos, no se generarán voltajes que retornen hacia las tarjetas de control. Eventualmente este es un problema común que ocurre con mayor frecuencia cuando se trabaja con motores a paso, al girarlos, éstos motores actúan como pequeños generadores y se generan fuerzas electromotrices que alimentan las tarjetas de control implicando una producción de intermitencias en cuanto a la suavidad y flujo de giro de las manijas. A simple vista puede parecer un pequeño detalle, pero éstas corrientes a largo plazo y en un uso continuo pueden llegar a afectar irreversiblemente las tarjetas de control.

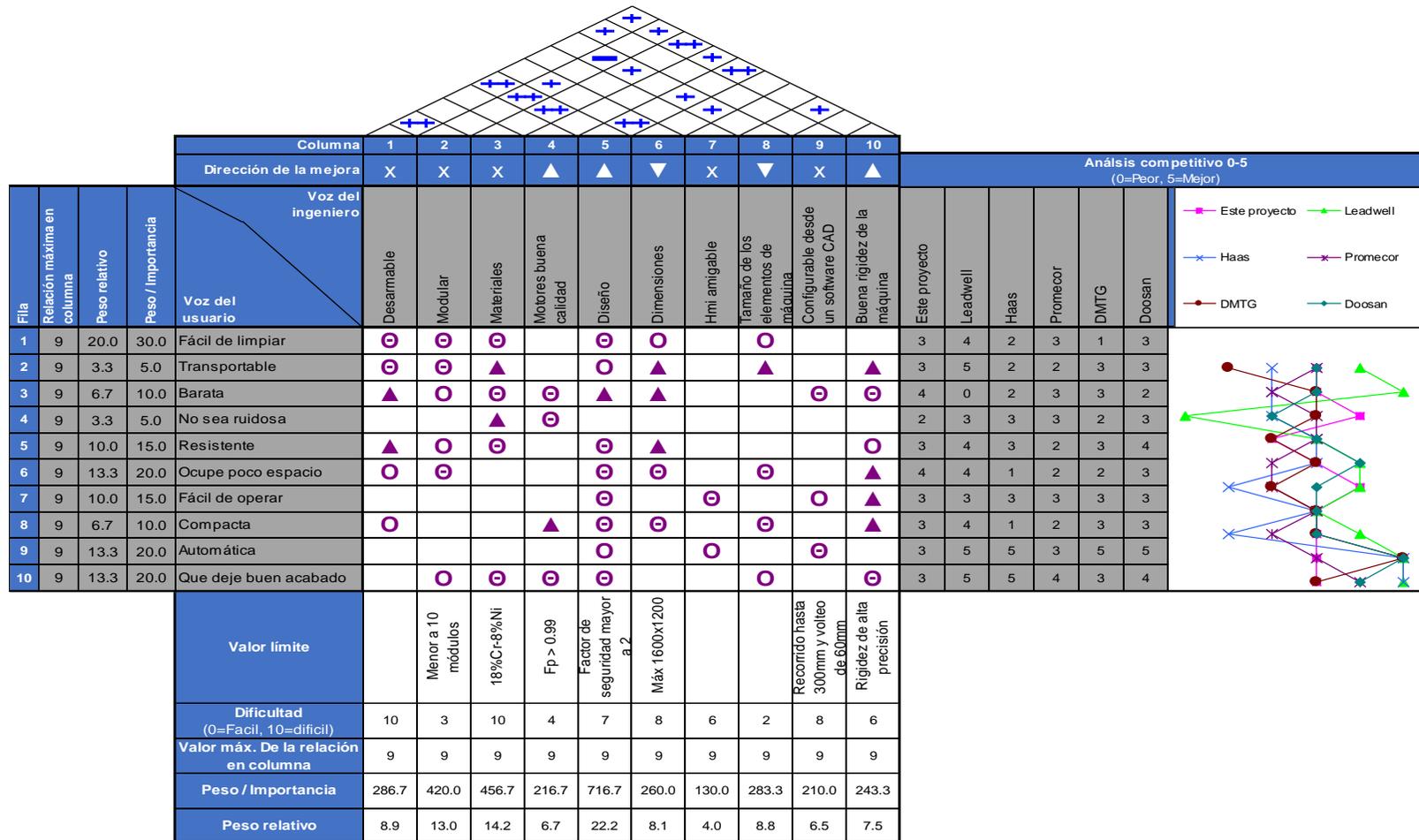
Por otra parte, como se mencionó anteriormente, se requiere que la máquina tenga también un modo automático, este hace precisamente referencia al control completo CNC, donde se debería completar el proceso que se muestra en la figura 2.3 a continuación:



**Figura 2.3.** Diagrama de flujo del uso de la máquina en modo automático.

## 2.2. ELABORACIÓN DE LA CASA DE LA CALIDAD

A continuación, se presenta el desarrollo de la casa de la calidad (anexo 1), donde se indica la voz del usuario y la voz del ingeniero:



Efectivamente, hay ciertos términos que se describen en la casa de la calidad, dentro de éstos, están que sea un sistema modular, que sea desarmable, la calidad de los materiales, diseño, facilidad de uso y otros parámetros de relevancia. Por supuesto que es imprescindible que esto sea loggable; sin embargo, en la fila de la dificultad se puede observar que lograr algunos de estos requerimientos es expresamente complejo.

En términos de diseño, lograr que un mecanismo que debe alcanzar una precisión tan pequeña sea modular y desarmable implica que se deben emplear mecanismos altamente elaborados y precisos lo cual incrementaría exponencialmente el costo de elaboración del proyecto excediendo el presupuesto.

### 2.3. DESARROLLO DE LA MATRIZ MORFOLÓGICA

Hasta este punto, se ha determinado cuales son las necesidades del usuario, sin embargo, se requiere definir cuál sería el funcionamiento y modo de control de la máquina, para lo cual se realiza una matriz morfológica, ver Tabla 5, en la que se indican los posibles modos de operación de la máquina y ciertos factores a nivel superficial.

**Tabla 2.1.** Matriz morfológica del torno CNC

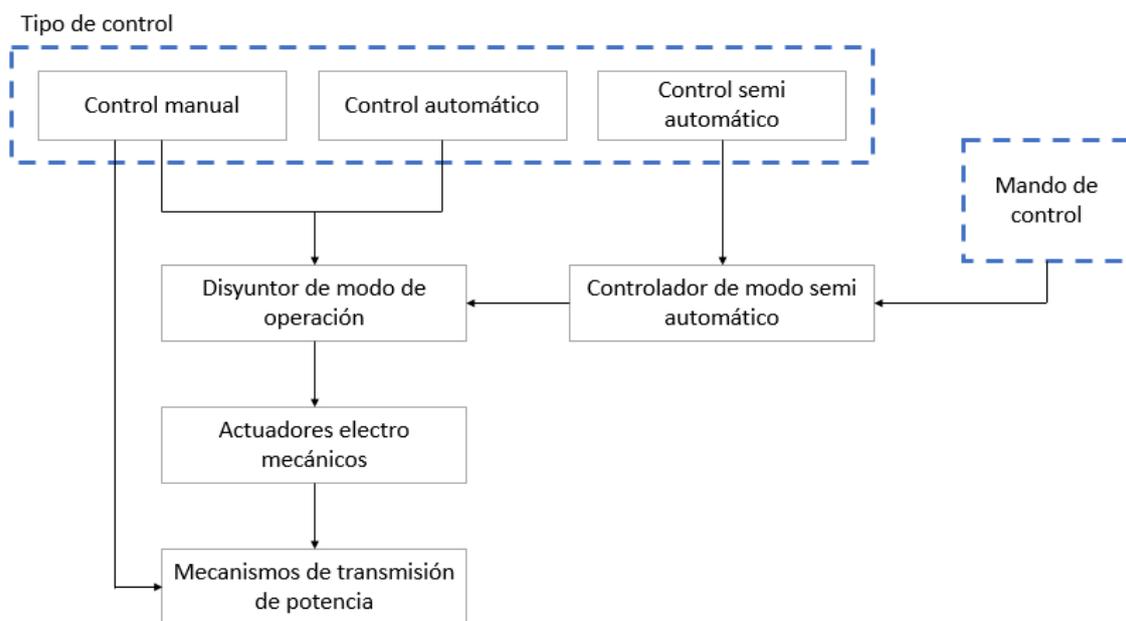
Tipo de control de la máquina	Gestión visual de la máquina	Ubicación de los mandos
Solo control CNC automático	Con HMI del modo CNC	En tablero y mando móvil con cable de 1.5m
Control CNC y Manual	Con HMI del modo CNC y HMI del modo semi automático	Solo tablero
Control CNC, Manual y Semi automático	Sin HMI	Solo mando aparte

Fuente: análisis personal.

Como se observa, el camino que se escoge es el de realizar 3 tipos de control, uno completamente automático, que opere únicamente bajo el modo CNC, otro tipo de control semi automático en el que se pueda operar a la máquina con la actuación de los motores de los ejes y de forma manual paralelamente, y aparte, que tenga un modo de control exclusivo que sea manual, en el que se puedan girar libremente los ejes.

## 2.4. DIAGRAMA FUNCIONAL DE LA LÍNEA DE MECANIZADO

Considerando que se tienen 3 diferentes tipos de control para la máquina, consecuentemente existen 3 diferentes caminos para poder controlar la máquina, esto se puede observar a continuación en la figura 2.4.



**Figura 2.4.** Diagrama funcional de la línea de mecanizado del torno.

Nótese que en la entrada hay 3 posibles modos de operación de la máquina, si se selecciona el modo automático, consecuentemente la máquina operaría únicamente a través de un ordenador. Si se selecciona el modo de control semi automático, no es un requisito tener un ordenador para poder operar la máquina,

para este tipo de control, se puede trabajar directamente sobre los ejes de la máquina de una forma manual y paralelamente de forma automática.

Finalmente, el modo de operación manual tiene una injerencia directa sobre los mecanismos de transmisión de potencia de la máquina, permitiendo controlar el movimiento de ambos ejes directamente.

Es importante notar que a pesar de que en el modo de control semi automático, se pueden también operar directamente los ejes de la máquina de forma manual, es sumamente importante tener un modo de control exclusivo que sea manual ya que de esta forma se garantiza que durante toda la operación en ningún momento se puedan activar automáticamente los ejes.

## **2.5. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL ÁMBITO MECÁNICO**

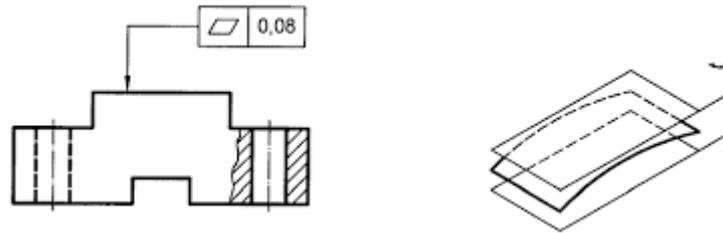
Con todos los parámetros antes definidos, considerando que se requiere una precisión de 200 micras y un desplazamiento horizontal en el eje Z de 300 milímetros, hay un fuerte reto por detrás en la selección de componentes mecánicos.

Efectivamente, sería ideal poder utilizar ciertos mecanismos que van a garantizar una operabilidad del 100%, una altísima precisión y exactitud y una rugosidad superficial excelente. Estos mecanismos existen en el mercado y se los podría acoplar a la máquina sin ningún problema, lamentablemente, este proyecto, como cualquier otro, tiene un presupuesto limitado que de cierta forma no permite utilizar todos los mecanismos en el mercado.

Comenzando por la parte estructural, hay diferentes alternativas, en función del costo y de su utilidad por supuesto. Es indispensable que la máquina cuente con una bancada rígida donde puedan soportarse todos los componentes mecánicos. La característica principal de esta bancada, es que debe tener una tolerancia geométrica de planicie de máximo 80 micras, la razón principal de esto es la restricción de precisión de la máquina de 200 micras en general, y, además

considerando que las piezas que se van a fabricar con esta máquina con sólidos de revolución.

Para esto, es de gran utilidad observar la Figura 2.5 donde se puede ver con mayor claridad cuál es la problemática bajo la que gira en torno la selección de una bancada que se acate a las tolerancias antes mencionadas.



**Figura 2.5.** Planitud en una superficie.

*Fuente:* upct.es

Una superficie que tenga una planicie incorrecta o que supere dicha tolerancia, al momento de mecanizar se generaría un sólido de revolución similar a un cono, tomando en cuenta que, en un punto de la superficie, la herramienta de mecanizado estaría más próxima al material y en otro punto estará más alejada, esto únicamente si se realiza un movimiento netamente longitudinal.

Hay diferentes opciones que se pueden escoger para la bancada de la máquina, a continuación, se detallan algunas de ellas:

- Plancha de acero cortada con plasma
- Plancha de acero cortada con láser
- Bancada de madera pulida
- Bancada plástica de acrílico cortada en láser

Dentro de estas opciones, y considerando los requisitos de estabilidad que debe tener la máquina, el material predominante es ampliamente el acero al carbono. Con una bancada sólida, que sea difícil de deformar y sobre todo que tenga una planicie aceptable sería la mejor opción para este proyecto.

Ahora se presenta la disyuntiva entre escoger una bancada de acero cortada en láser o una cortada en plasma, y aquí, hay que considerar dos diferencias importantes, la exactitud y el costo.

Para el caso de una bancada que sea armada con diferentes bloques de acero cortados en láser, se tendría una exactitud bastante buena, incluso, se podrían realizar los agujeros sobre la bancada que sean necesarios para soportar los demás materiales y mecanismos que van sobre ella, sin embargo, el factor negativo aquí, viene a ser el elevadísimo coste de esta operación en comparación al corte por plasma, para el caso de Ecuador, es cerca de 10 veces más costoso.

Por otra parte, la última opción, que es la de realizar una bancada de acero que sea cortada con plasma. Esta es sin duda la mejor opción considerando que hay una muy amplia variedad de espesores en cuanto a las planchas que se pueden escoger para cortar. Los puntos negativos del plasma son múltiples en comparación con el láser.

El primer punto negativo, es que se debe encontrar una plancha de acero que tenga la planitud requerida. En la mayoría de acerías del país, las planchas de acero vienen enrolladas para el caso de espesores bajos, por lo general, inferiores a 3 mm. Observar la Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Rollo de acero de 2.5 mm de espesor.

*Fuente: ADELCA Ecuador*

Para el caso de planchas con espesores superiores, la producción y comercialización se la realiza en planchas de grandes dimensiones, tal como se observa en la Figura 2.7.



*Figura 2.7. Producción y comercialización de planchas de acero A36.*

*Fuente: ADELCA Ecuador*

El principal problema que se genera con esto, es que, al momento de realizar el transporte de estas planchas, se descarga de los camiones con grúas y montacargas, y tomando en cuenta que la mayoría de estas planchas vienen de un largo superior a los 2 metros, al descargarlas, se deforman permanentemente por el peso, haciendo que estas tengan algunas imperfecciones superficiales y en algunos casos serían inutilizables para este proyecto.

Para evitar este problema, se debe realizar una exhaustiva búsqueda en la fábrica de aceros de una plancha de grosor aceptable, inferior a 20 milímetros ya que el costo sube dramáticamente.

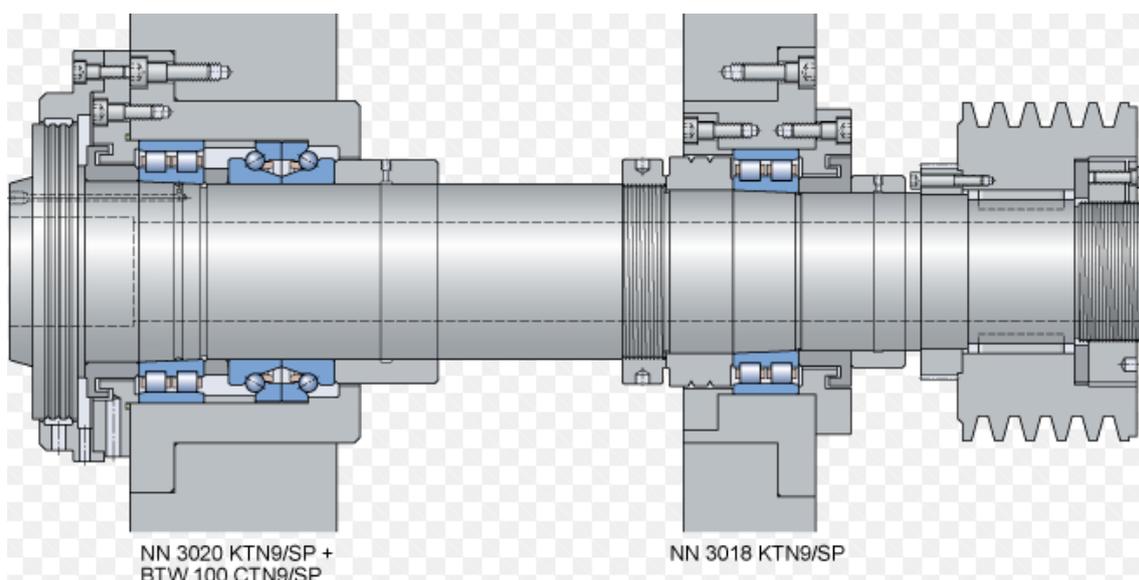
Con este problema solucionado se podría utilizar sin mayor complicación una plancha de acero A-36 de bancada. Se escoge este material ya que es ampliamente utilizado en la industria y las planchas de acero tienen un costo muy

inferior en comparación con planchas de acero de otros materiales con mejor calidad.

Es importante tener en cuenta que el plasma únicamente podría realizar el corte del contorno de la bancada, razón por la que los agujeros se deben realizar en un proceso separado.

Con la bancada estable y rígida se pueden determinar cuáles serían los siguientes mecanismos, siguiendo por el conjunto del husillo.

Para el montaje del husillo hay varias alternativas, este es un proceso muchísimo más complicado que la bancada puesto que tiene que tener una tolerancia geométrica de concentricidad, inferior o igual a 0.05 milímetros, se debe tener en cuenta que, al ser sólidos de revolución, las tolerancias afectan al diámetro de la pieza por un factor de 2, es decir, una tolerancia de 0.05 milímetros podría ocasionar un error dimensional resultante de 0.1 milímetros. Hay diferentes posibilidades para esto. Comúnmente, los husillos de torno son mecanismos bastante complejos que son específicamente diseñados para soportar elevadas cargas radiales y medias cargas axiales. A continuación, un ejemplo en la Figura 2.8 de un husillo de torno comercial.



**Figura 2.8.** Husillo de torno comercial.

**Fuente:** SKF Internacional

Haciendo un análisis más profundo de la imagen anterior, podemos observar que tiene 3 rodamientos (pintados de color azul), dos de ellos, son rodamientos de doble hilera de agujas, y adicionalmente tiene un rodamiento de bolas de contacto angular.

Los dos rodamientos de agujas tienen la función principal de soportar las elevadas cargas radiales que se producen durante el mecanizado. Durante un proceso de mecanizado, según Sandvik [2], un fabricante de amplia experiencia en la fabricación de herramientas para el mecanizado, con la siguiente ecuación se puede aproximar el valor de la fuerza tangencial que se genera durante un mecanizado:

$$F_t = K_c \times \left( \frac{0.4}{f_n \times \sin(KAPR)} \right)^{mc} \times f_n \times AP \quad (1)$$

De la ecuación anterior los valores son los que se indican a continuación:

- $K_c$ : es la fuerza de corte específica para un avance de 0.4 mm/rev, este es un valor promedio proporcionado por Sandvik para aceros al carbono con una dureza inferior a los 125 HB.
- $f_n$ : es el avance por revolución. Para el ejemplo se utilizará un avance por revolución de 0.5 mm / rev.
- $KAPR$ : es el ángulo de posición del buril en referencia al eje Z del torno. En este caso, el proceso más común es el cilindrado.
- $AP$ : es la profundidad de corte que, para este caso, se utilizará 1 milímetro.

Sustituyendo los valores arriba mencionados en 1, se obtiene una fuerza tangencial de corte de 374 N.

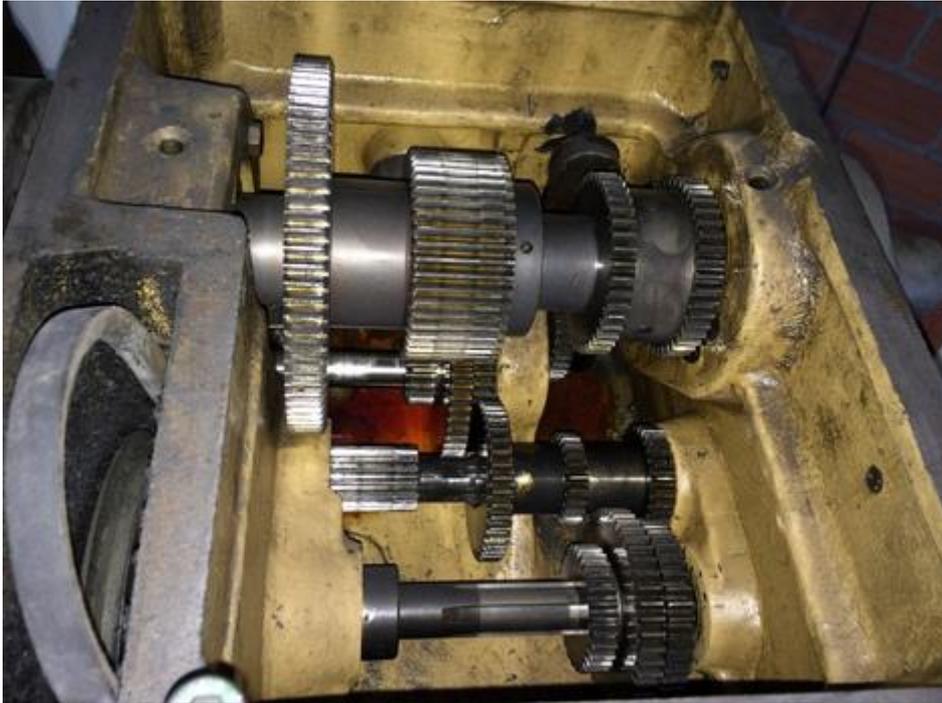
A esta fuerza, se le debe sumar la distancia a la que se mecaniza ya que, por consecuencia, si la distancia es mayor, mayor sería la fuerza que deben soportar los rodamientos del husillo.

Una fuerza tangencial de 374 N, es equivalente a tener una masa de 38 kg aproximadamente, suspendida sobre el husillo.

Con una carga de esas características, es sumamente importante realizar un diseño robusto del husillo, de forma que se puedan soportar estas cargas y adicionalmente, que pueda garantizar una tolerancia geométrica de concentricidad ajustada.

Con el antecedente de la carga mencionada, y realizando un breve análisis en lo que respecta a la fabricación del husillo se puede afirmar que realizar un conjunto ensamblado de 3 rodamientos con la estructura del que se indica en la Figura 2.8, resultaría excesivamente costoso. En el primer capítulo se realizó una comparativa visible en la Tabla 1.1 de diferentes tipos de tornos comerciales, estas son máquinas industriales de alto rango. Según el portal [16], una máquina industrial de alta precisión es aquella que alcanza tolerancias inferiores a 0.1 milímetros, una máquina de mediana precisión es aquella que logra alcanzar precisiones de entre 1 y 0.1 milímetros y una máquina de baja precisión es aquella que tiene tolerancias superiores a 1 milímetro, estas tolerancias son solo aplicables para maquinaria de mecanizado en metal. La máquina que se pretende realizar es una máquina pequeña, de características de mediana precisión, realizar un conjunto tan complejo excedería los requerimientos propuestos.

Por otra parte, en el ensamble de la Figura 2.8, se indica un husillo que está montado sobre dos apoyos con rodamientos, sin embargo, este tipo de montaje es muy característico de tornos que tienen una bancada sólida de fundición, donde se realiza un rectificado de la bancada para colocar el asiento de los rodamientos, esto tiene múltiples ventajas, ya que la base de los rodamientos es bastante firme y por consecuencia se reducen drásticamente las vibraciones que se generan durante el mecanizado. A continuación, en la Figura 2.9 se indica una caja Norton, muy comúnmente utilizada en tornos.



*Figura 2.9. Caja Norton con soportes en la fundición.*

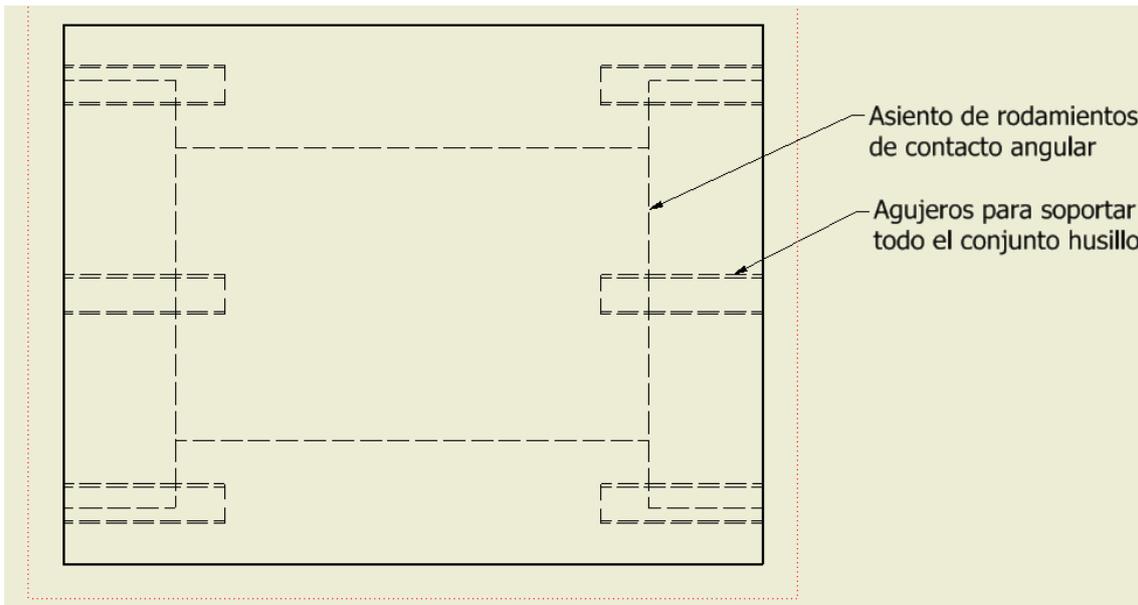
*Fuente: tomado de Google Imágenes*

Como se observa en la imagen anterior, los soportes de los ejes de transmisión están asentados sobre la bancada directamente, muy seguramente con rodamientos o con bujes de bronce grafitado.

Como se indicó anteriormente, para el caso de esta máquina, no se utilizaría una fundición por el altísimo costo que esto implicaría, sino, se utilizaría una plancha de acero, que cumpliría la función de bancada, esto tiene distintas implicaciones, ya que, al no tener bancada, el mecanismo del husillo debe ser un solo cuerpo, entre el soporte del husillo, los rodamientos y el soporte del mandril.

Por otra parte, si el husillo no está soportado directamente sobre la bancada, el uso de engranajes se complica, considerando que se debe elaborar una estructura bastante precisa para que pueda soportar el conjunto del husillo y los engranajes que se acoplarían a este, realizar una estructura precisa, en una plancha de acero de 20 milímetros de espesor incrementaría bastante el costo.

Hasta ahora, la idea que se tiene en mente de realizar el conjunto del husillo es algo similar a lo que se indica en la Figura 2.11. Para esto, se debe realizar una base que permita alojar los rodamientos, esta base se indica en la Figura 2.10



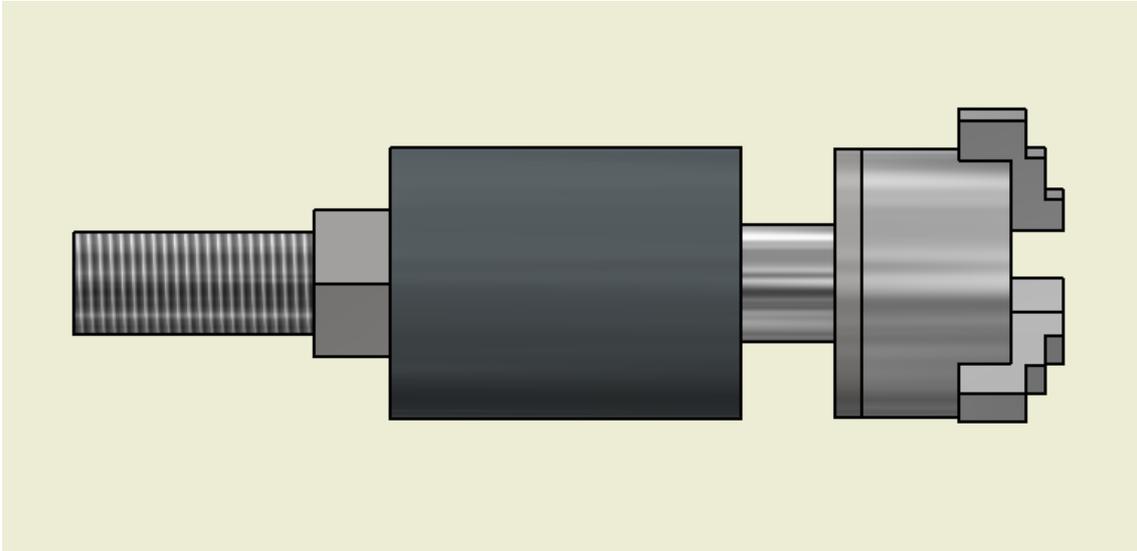
**Figura 2.10.** Estructura preliminar del soporte del conjunto del husillo.

En la Figura 2.10, se observa que se tiene 2 alojamientos para únicamente 2 rodamientos. Esto implica que no se pueden colocar sólo rodamientos radiales de agujas, puesto que cualquier carga axial sobre el sistema provocaría una desestabilización y consecuentemente un mal acabado superficial.

En este punto, se genera un nuevo inconveniente, hasta el momento, únicamente se ha mencionado acerca de los soportes de los rodamientos, tal como se indica en la Figura 2.10, sin embargo, por dentro de este conjunto, se localiza el husillo, que gira soportado en estos rodamientos.

A pesar de que los rodamientos soportarán todas las cargas radiales que se generen durante el mecanizado, también tienen la función de soportar fijamente contra cualquier carga axial que pudiese generarse durante el trabajo. En un proceso de cilindrado común, las cargas axiales que se generan son en ambas direcciones, es decir, hacia dentro del mandril, y hacia fuera del mismo. Por esta razón, el diseño debe ser óptimo para soportar ambas cargas axiales y efectivamente, es la idea de haber escogido el diseño que se indica en la figura 2.11, puesto que con este mecanismo y un adecuado sistema de fijación se puede soportar estas cargas sin mayor dificultad.

Nótese que, dentro del soporte que aloja los rodamientos (en gris oscuro de la Figura 2.11), va asentado el husillo y por consecuencia, en el husillo se asienta el mandril. Observe la Figura 2.11.



*Figura 2.11. Estructura del husillo del torno CNC.*

Como se indica en la Figura 2.11, se coloca una tuerca en la parte posterior del ensamble del husillo, de esta forma se puede ajustar a todo el conjunto del husillo. Aprisionado por el lado derecho con una pequeña ceja de mayor diámetro que el rodamiento y por la parte izquierda una tuerca que mantenga todo el conjunto aprisionado.

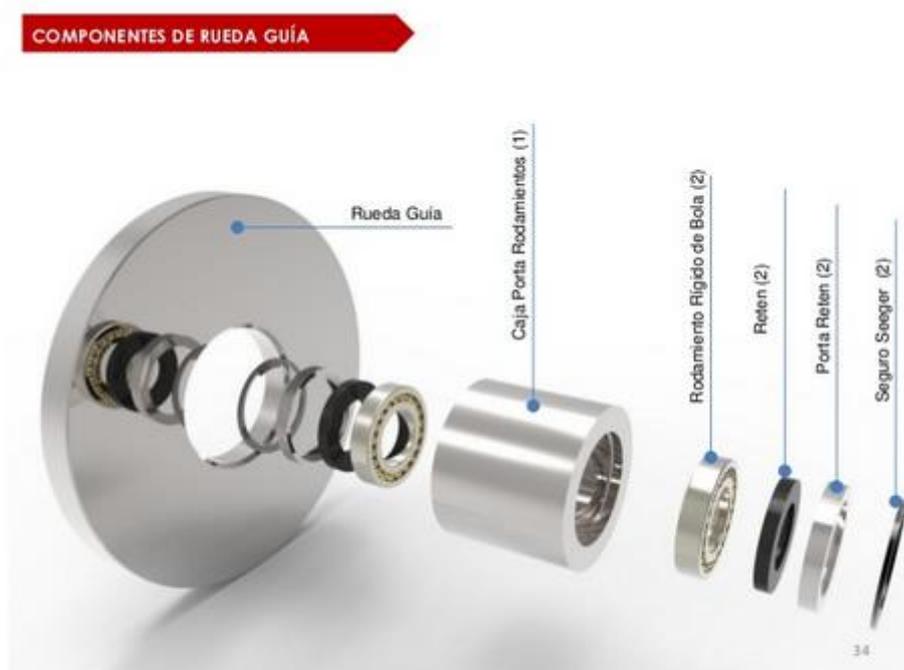
Hay una razón específica por la cual se decidió escoger una tuerca, en sustitución de cualquier otro mecanismo de sujeción. El principal – y más comúnmente utilizado – es el seguro seeger. Observar la Figura 2.12 a continuación.



**Figura 2.12.** Seguro seeger para exteriores de ejes.

**Fuente:** tomado de Google Imágenes.

Los seguros seeger son ideales para sujetar diferentes mecanismos como los que se observan a continuación en la Figura 2.13.



**Figura 2.13.** Ejemplo de aplicación de un seguro seeger.

**Fuente:** Empresa ARAUCO S.A.

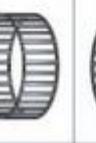
La principal desventaja que tienen los seguros seeger, es que son poco precisos, es decir, cumplen excelentemente bien su función de sujetar un ensamble, pero tienen un pequeño juego mecánico que es el que garantiza que el seguro pueda ser extraído con facilidad.

Esto efectivamente hace de este tipo de mecanismos que no puedan ser utilizados en esta máquina, ya que una holgura en el canal del seguro seeger haría que durante el mecanizado se generen vibraciones y en consecuencia se genere un acabado superficial indeseado.

Por esta razón, en base al catálogo de rodamientos FAG [1], se procede a revisar cuales serían los rodamientos óptimos para esta situación, considerando que, según el portal de Sandvik [2], la fuerza axial que se genera durante un proceso de cilindrado convencional puede ser hasta 10 veces menor que la fuerza tangencial ocasionada por el mismo proceso.

Y adicionalmente, se debe tomar en cuenta que, ya que el mecanismo se sujeta con una tuerca que es la encargada de aprisionar todo el conjunto, se debe utilizar algún rodamiento que soporte una carga axial mediana, o al menos equivalente a la carga radial que se genera durante el mecanizado.

Según el catálogo de rodamientos, se pueden encontrar gran variedad de estos, con diferentes características, usos y aplicaciones [17], esto es visible en la Figura 2.14.

Tipo	Anillo exterior	Anillo interior	Cuerpos rodantes	Material sintético	Chapa embutida	Maciza mecanizada
 Rod. de rodillos a rótula						
 Rodamiento de agujas						
 Rod. axial de bolas	 (arandela-ajuste)	 (arandela-eje)				
 Rod. axial de rodillos a rótula	 (arandela-ajuste)	 (arandela-eje)				

**Figura 2.14.** Tipos de rodamientos FAG.

**Fuente:** Rodamientos FAG

De los rodamientos arriba indicados, los que son de agujas y para carga radial estarían fuera de las opciones para escoger. Los rodamientos de bolas para carga radial estarían también fuera de las posibilidades.

Quedarían únicamente los rodamientos de bolas de contacto angular y los rodamientos de rodillos de contacto angular. He aquí la disyuntiva, puesto que ambos serían una muy buena opción para el husillo, pese a que los rodamientos de rodillos son aproximadamente un 15% más costosos que los rodamientos de contacto angular de bolas.

La principal ventaja de los rodamientos de rodillos, es que soportan cargas axiales mucho más elevadas que los rodamientos de bolas de contacto angular, precisamente por la estructura que tienen, garantizan soportar cargas radiales bastante elevadas.

Por esta razón se escoge a los rodamientos de rodillos cónicos de contacto angular como los que mejor encajarían para esta aplicación. Ver Figura 2.15.



**Figura 2.15.** Rodamientos de rodillos cónicos de contacto angular seleccionados.

**Fuente:** FAG rodamientos.

Hay una ventaja muy importante que caracteriza a este tipo de rodamientos, y es precisamente que son separables. Esto quiere decir, que es posible separar

la pista interna de la pista externa lo cual facilita muchísimo el montaje garantizando la vida útil del rodamiento.

Con dos de estos rodamientos acoplados, uno a cada lado del soporte del husillo, se forma lo que se conoce como una jaula axial, este es un mecanismo que permite aprisionar firmemente el eje o husillo que se encuentra soportado por los rodamientos de forma que se garantice la máxima estabilidad y la concentricidad más ajustada posible.

Con este conjunto del husillo armado, únicamente estaría pendiente el ajuste y soporte del mandril hacia este conjunto. Para esto, definitivamente la alternativa que va más ligada al costo, es la de soldar un plato del mismo diámetro del mandril al husillo, de forma que se pueda sujetar sin mayor inconveniente.

Con el ensamble del husillo listo, se puede determinar cuáles serían las mejores alternativas para los mecanismos de transmisión de potencia. Comenzando por el ensamble del husillo, es importante reconocer que a pesar de que el conjunto del husillo es un mecanismo bastante estable, va a estar sujeto a la bancada con dos planchas cortadas con plasma, lo cual implica que no podrá ser ajustada y calibrada con mucha exactitud, esto se debe principalmente a que después del corte láser, los contornos de las planchas tienen una forma triangular. Ver la Figura 2.16.



**Figura 2.16.** Acabado posterior al corte por plasma. Nótese el acabado triangular en los contornos.

**Fuente:** tecmecansl.com

Con una baja capacidad de posicionamiento exacto del conjunto del husillo en referencia con la bancada, resulta sumamente complejo hacer uso de engranajes, puesto que estos requieren que los dientes acoplen con gran exactitud para que el movimiento tenga la mayor fluidez posible, evitando en todos los aspectos el calentamiento y desgaste excesivo.

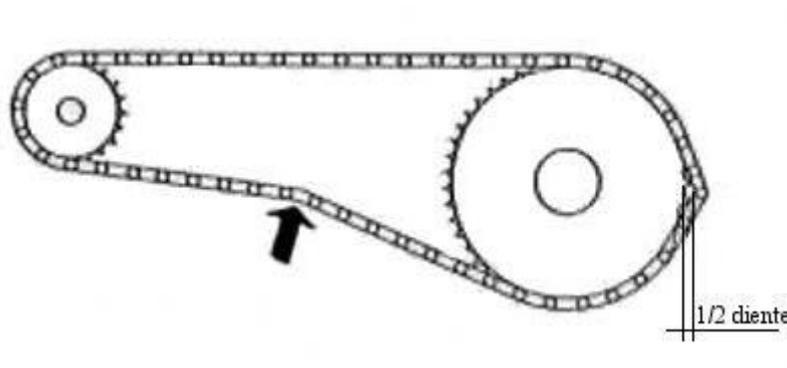
Este es uno de los problemas que se genera por el uso de engranajes, otro de ellos, es que para realizar el cambio de velocidades se requiere una pequeña caja de cambios, o al menos un par de ejes paralelos que lo permitan, y que involucren una serie de mecanismos que garanticen una buena estabilidad, esto no es solo más complicado realizar, sino que es mucho más costoso.

La fabricación de engranajes es bastante costosa en el Ecuador, se suele cobrar alrededor de 0,8 centavos de dólar por cada diente del engranaje, efectivamente dependería del módulo, pues a mayor módulo el costo se incrementa por el valor comercial de la herramienta.

Otra alternativa, es el uso de piñones con cadena, ya que soportan altas cargas y su mantenimiento no genera mayor complicación. La principal desventaja de

las cadenas, es que, para colocarlas, se requiere colocar un tensor que garantice que la cadena se mantenga en una tensión óptima.

Si la cadena está muy floja como se observa en la Figura 2.17, se pueden generar inconvenientes como que se salten dientes y por consecuencia se generen fuertes vibraciones.



**Figura 2.17.** Cadena sin tensar, con un salto de diente.

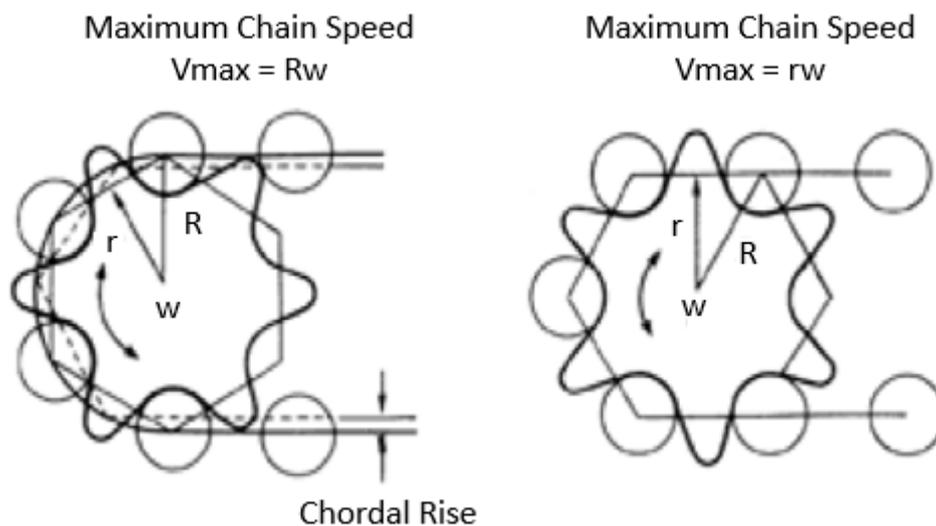
*Fuente: imágenes de google.*

Por lo general, un torno puede alcanzar altas revoluciones, hay casos donde tornos industriales alcanzan 10k revoluciones, por lo que todo debe ser bastante preciso para evitar en la medida de lo posible cualquier vibración que pudiese generarse. Un grave problema de la cadena, es que es verdaderamente complicado tensarla totalmente, esto tiene varias implicaciones.

El conjunto del husillo va sujeto con una tuerca por la parte posterior, lo que indica que el piñón debería ir asentado sobre esta tuerca, este ensamble generaría una desviación parcial provocando un pequeño des-alineamiento paralelo, entre la cara del piñón y el eje de rotación del husillo, esta desalineación involucra un riesgo de la cadena se salga durante el mecanizado, generando posibles accidentes.

Si el piñón, ya sea, el del motor, o el del husillo, no está precisamente centrado con referencia al eje de rotación, se produce un ligero “tambaleo” que ocasiona que no se pueda templar la cadena totalmente, dejándola ligeramente destemplada.

Utilizar una cadena destemplada en un mecanismo que gira a altas velocidades es totalmente contraproducente. En una cadena que se monta sobre piñones de diámetros no tan grandes, se produce un efecto conocido como acción de cordal, en el que la posición en la que engranan los dientes varía y por consecuencia la cadena vibra en conjunto con esta fluctuación. En la Figura 2.18, se indica este efecto. Nótese que el radio desde el centro del eje hasta la tangente es mayor que cuando la cadena engancha en un acorde.



**Figura 2.18.** Efecto de cordal o de polígono en una cadena.

**Fuente:** Expoimsa, cadenas industriales.

Esta es precisamente una de las razones por las que no se puede templar totalmente una cadena. Con una ligera pérdida de tensión de la cadena y una rápida rotación, se generan fuertes vibraciones que difícilmente podrían ser absorbidas por una bancada tan pequeña.

Descartando de entrada el uso de cardanes y ejes por el altísimo costo que implicaría fabricar estos mecanismos, el restante es utilizar una banda para poder transmitir la potencia desde el motor hasta el husillo.

Si se va a utilizar una banda como el mecanismo de transmisión de potencia, resulta conveniente hacer un breve análisis en cuanto a la selección de la

velocidad del motor y de los diámetros de poleas que deberían ir colocados en el husillo.

Comenzando por esto último, y teniendo en cuenta que los procesos de mecanizado se suelen realizar a altas velocidades, es decir, sobre las 3000 revoluciones por minuto, es importante incorporar una polea pequeña para que no se requiera una gran relación de transmisión y alcanzar esas velocidades.

En Ecuador hay poleas comerciales que son poco costosas, son utilizadas en gran variedad de procesos industriales, producidas por la fábrica Ecuapolea. En la siguiente Figura 2.19 se muestran algunas de ellas.



**Figura 2.19.** Poleas para correa tipo A.

**Fuente:** Ecuapolea

El uso de correas permite alcanzar altas velocidades con menores vibraciones, por lo que resultan ser ideales para este proyecto. El diámetro de las poleas que se utilizan en conjunto con el husillo se determina más adelante en la sección de dimensionamiento.

Con todo el conjunto de husillo y motor armados, es posible avanzar a la parte de movimiento lineal y transmisión de potencia para los ejes. Considerando que la máquina requiere una precisión de 200 micras, hay gran variedad de posibilidades en el mercado que permiten alcanzar esas precisiones, sin embargo, la idea sería superar un poco esa barrera limitante alcanzando una precisión mejor y un acabado superficial excelente.

Las posibilidades que hay en el mercado para el movimiento lineal son las que se detallan a continuación:

- Guías lineales circulares con rodamiento lineal, ver Figura 2.20 a continuación.



*Figura 2.20. Rodamiento lineal con guía rectificada.*

*Fuente: SKF Internacional*

Este tipo de guía lineal es ampliamente utilizada en la industria para diferentes tipos de movimiento lineal, sin embargo, tiene un fuerte punto negativo. Al ser una guía redonda en todo el contorno, puede únicamente ser apoyada en los extremos, por esta razón, durante un trabajo de mecanizado en el centro de la barra, los momentos generados ocasionarían una deformación elástica en la barra provocando una dramática pérdida de exactitud.

De cierta forma se podría mitigar esto colocando una barra más gruesa con rodamientos más grandes, sin embargo, esto resultaría ser bastante costoso.

- Guía lineal rectificada con base y rodamiento lineal de cara plana, ver Figura 2.21 a continuación.



**Figura 2.21.** Guía lineal rectificada con rodamiento lineal de cara plana.

*Fuente: SKF Internacional.*

A breves rasgos, esta guía parecería ser la óptima para este tipo de trabajos, ya que soportaría un poco mejor los momentos que se generan durante el mecanizado. Sin embargo, según el portal SKF estas guías son fabricadas para cargas entre rango bajo – medio, precisamente por la forma que tienen están diseñadas para soportar las cargas más fuertes de forma radial y perpendicular a la base. Esto resulta improductivo en el torno, ya que implicaría colocar las dos guías paralelas entre si y fabricar una estructura perpendicular a la base de la máquina para soportar las cargas radiales generadas.

Sin embargo, de forma paralela a la base de las guías, la carga radial generada por el peso de la bancada debería ser soportada permanentemente, lo que a largo plazo dañaría los rodamientos.

Un fuerte punto negativo, es que los rodamientos más comerciales que se utilizan en estas aplicaciones, son de aluminio y se acoplan mediante pernos M4 al mecanismo móvil. En los procesos de mecanizado se requiere que las piezas puedan soportar exigentes cargas por lo que un rodamiento fabricado en aluminio seguramente no sería la opción más viable en este caso. Hay otras opciones en el mercado que pueden ser más aplicables.

- Guías lineales rectificadas con bloque lineal

Son las alternativas más caras y las más ampliamente utilizadas en la industria de precisión, un ejemplo de éstas se muestra en la figura 2.22.



*Figura 2.22. Guía lineal rectificada HIWIN.*

*Fuente: HIWIN Corporation.*

Hay que tener presente que lo que se busca principalmente con los posibles diferentes métodos de desplazamiento lineal es que se reduzca en la medida de lo posible el juego mecánico y que las vibraciones que se generan en el mecanizado no afecten – o afecten lo menos posible – al acabado superficial de la máquina.

Las guías lineales hay de gran variedad, ampliamente distribuidas por todo el mundo, provenientes de diferentes marcas y proveedores. Hay que escoger cuidadosamente, puesto que una guía lineal de este tipo de baja calidad afectaría la calidad del proyecto en general.

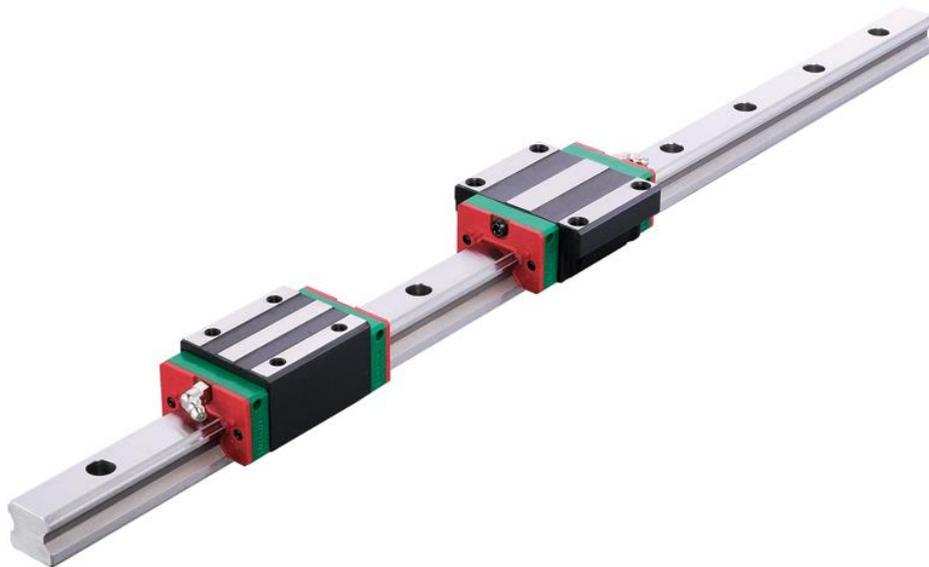
Después de una fuerte investigación realizada, se determinó que la marca ganadora es Hiwin Linear Rails. Estas guías, no son las mejores ni las más caras, pero tampoco son de baja calidad. Son guías de rango medio, cuyo costo es relativamente accesible en comparación con las guías de las mismas

características, pero de marca SKF o FAG, cuyo costo duplica literalmente el valor de las guías Hiwin.

Dentro de la página web de Hiwin, hay una enorme variedad de productos, de distintos tamaños, para diferentes aplicaciones y para operar en entornos específicos, a continuación, las guías ofertadas.

- Series HG
- Series EG
- Series CG
- Series RG
- Series WE
- Series MG
- Series QH
- Series QE
- Series QW

De todas las mostradas anteriormente, las más comúnmente utilizadas para este tipo de maquinaria CNC son las series HG. En la figura 2.23 se indica la serie que se utilizó.



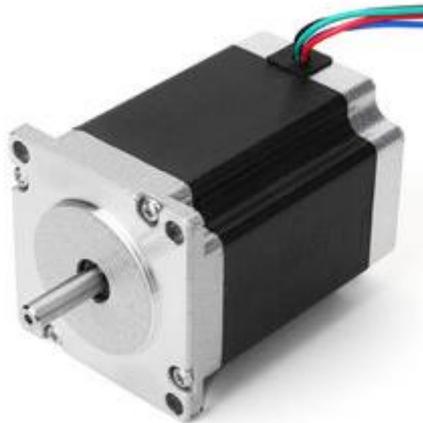
**Figura 2.23.** Hiwin series HG de 20 milímetros.

**Fuente:** Hiwin Corp

En lo que respecta a guías lineales, estas pueden soportar altas cargas axiales y radiales, de hecho, la más pequeña, puede soportar cargas de hasta 11.38 kN. En todo caso, en secciones siguientes se indicará la riel y rodamiento que se escogieron.

Finalmente, queda pendiente la transmisión de potencia rotacional, lineal y la selección de motores.

Los motores más utilizados en este tipo de máquinas son los motores a paso. Esto debido a su gran facilidad para controlar la velocidad angular y la posición angular. Idealmente se debería utilizar motores a paso con encoder, ya que, en comparación con su contraparte, estos tienen una precisión altísima y ofrecen gran versatilidad y rapidez. Lamentablemente su coste triplica el valor de un motor a paso comercial sin encoder. Los motores a paso que se utilizarían serían los que se indican a continuación en la Figura 2.24.



**Figura 2.24.** Nema 23 escogido como dispositivo electromecánico para el movimiento de los ejes.

**Fuente:** tomado de Google Imágenes

Nótese que dentro de esta gama de motores NEMA, existen diferentes tamaños, sin embargo, los más comerciales son los que se indican en la figura 2.24.

Ahora bien, lo restante es determinar los mecanismos de transmisión de potencia, y los acoples que se utilizarían entre el motor y los tornillos.

Para la transmisión de potencia, de igual forma hay una extensa variedad de opciones, entre ellas sin duda la más utilizada es el tornillo de potencia. Este tipo de mecanismos de transmisión de potencia son los que más se utilizan en la maquinaria CNC.

Por otra parte, existe la posibilidad de utilizar una correa dentada como la que se indica en la Figura 2.25.



**Figura 2.25.** Correa dentada como mecanismo de transmisión de potencia.

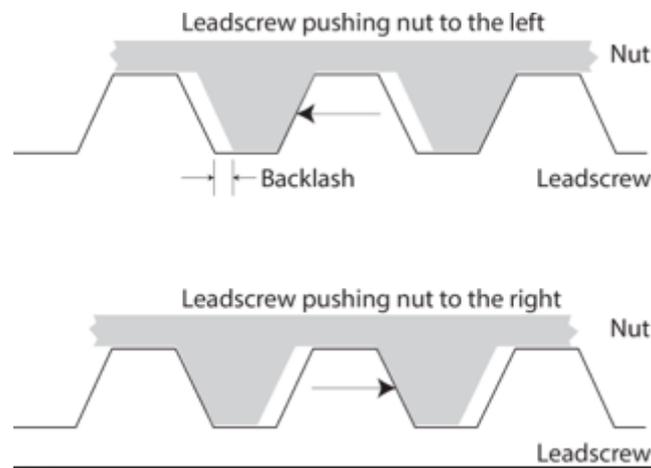
**Fuente:** tomado de Google Imágenes.

Efectivamente, pese a que la correa tiene dientes que engranan a la perfección con los engranajes y promete ser bastante precisa, en trabajos que demandan fuerzas relativamente altas, la misma elasticidad de la banda genera un ligero juego mecánico, que eventualmente desencadenaría en una pérdida de precisión.

Por esta razón se utilizan tornillos de potencia que permitan garantizar que cualquier fuerza que se genere durante la operación pueda ser soportada sin ninguna complicación.

Pese a que estos son los mecanismos de transmisión de potencia más comunes, tienen un grave inconveniente en lo que respecta a precisión y vibración.

En la Figura 2.26 se puede observar un tornillo de potencia con una tuerca acoplados.



**Figura 2.26.** Juego en los tornillos de potencia.

**Fuente:** CNC Workshop.

Eliminar el juego en un tornillo de potencia no es en lo absoluto una tarea sencilla. Además de que, resulta prácticamente imposible eliminar el juego en su totalidad, lo que se puede hacer, es reducirlo considerablemente.

Hay diferentes mecanismos que permiten reducir el juego, unos que actúan directamente sobre el tornillo, otros que actúan directamente sobre la parte de la bancada y otros que van colocados sobre la parte móvil, la que, de ahora en adelante, la denominaremos base del eje X.

Obsérvese en la Figura 2.27, que se suele utilizar un resorte, como mecanismo más común para eliminar el juego en los tornillos de potencia.



*Figura 2.27. Uso de un resorte para eliminar el juego en un tornillo de potencia.*

*Fuente: tomado de Google Imágenes.*

Para el caso de esta máquina, se utilizará un mecanismo similar con el accionar de un resorte que permita reducir, en la medida de lo posible el juego mecánico que se genera entre la tuerca y el tornillo.

Finalmente, resta determinar el acople que va entre el motor y el tornillo de potencia. Los acoples más comunes son elaborados en una aleación de aluminio, tal como los que se indican a continuación en la Figura 2.28.



**Figura 2.28.** Acople de aluminio para unir el motor a pasos con el tornillo de potencia.

**Fuente:** tomado de Google imágenes.

## 2.6. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOFTWARE

Con todas las opciones mecánicas establecidas sobre la mesa, se puede hacer una aproximación sobre cómo se debe hacer la conexión y que elementos se deberían utilizar en el ámbito de control.

Para esto, como se indicó anteriormente, se tienen 3 modos de control de la máquina, un modo manual, un modo semi automático y un modo completamente automático.

Comenzando por el modo automático, en el que idealmente, se coloca la pieza – de forma manual – en las mordazas de la máquina, se calibra manualmente ajustando las coordenadas correspondientes y posteriormente se da inicio al código G para que se comience a ejecutar la programación.

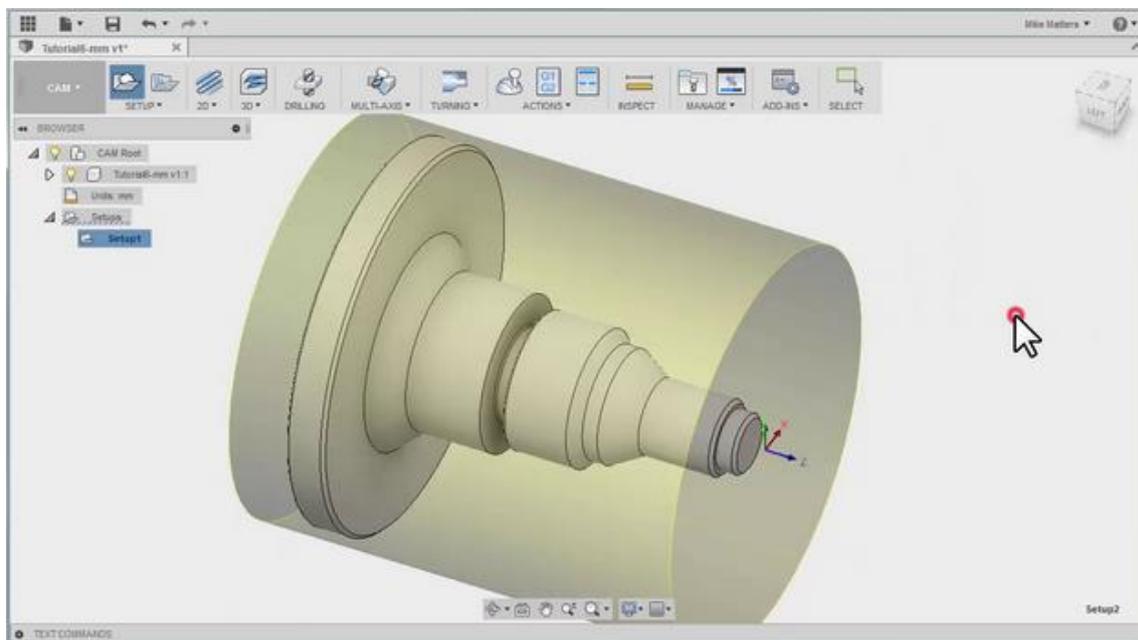
Esto implica que se debe hacer uso de un software CAD, un software CAM y un procesador de código G. Para el caso del software CAD se puede utilizar cualquier software que sea compatible entre CAD y CAM. Sin embargo, para este caso, se utilizará Autodesk Inventor, ya que se ha venido realizando el diseño de las piezas más ampliamente aquí.

En el caso del software CAM, hay variedad de opciones, sin embargo, es muy importante tener en mente que se debe buscar una alternativa que sea aplicable a tornos CNC y que permita configurar todos los parámetros de la máquina y las herramientas que se utiliza.

Dos potentes opciones se han concluido en esta investigación: Autodesk Fusion 360 y Mastercam.

Ambos son dos procesadores CAD - CAM tremendamente potentes, permiten realizar gran variedad de operaciones de mecanizado. Sin embargo, por temas de capacitación y cronograma se debe optar por la realización de pruebas para determinar cuál de los dos programas puede ser más aplicable a este proyecto.

La pantalla de inicio de Fusion 360, es bastante interesante, hay infinidad de opciones por explorar, soporta todas las opciones de mecanizado en torno CNC. En la Figura 2.29 se muestra una captura de pantalla de este poderoso software.

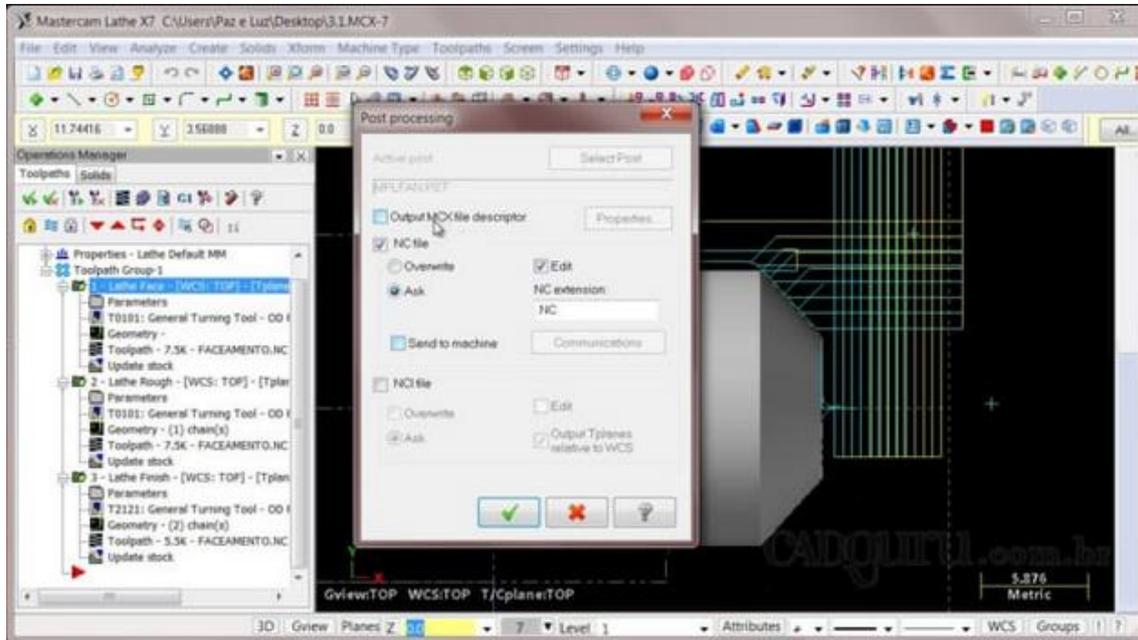


**Figura 2.29.** Pantalla principal CNC para el torneado.

*Fuente: Autodesk Oficial*

Una desventaja de Fusion 360 es que, al ser un programa tan potente, configurar una máquina pequeña, simple, con apenas dos ejes, sin torreta intercambiable, hace que la operación se complique un poco y no es tan amigable para realizar este tipo de configuraciones.

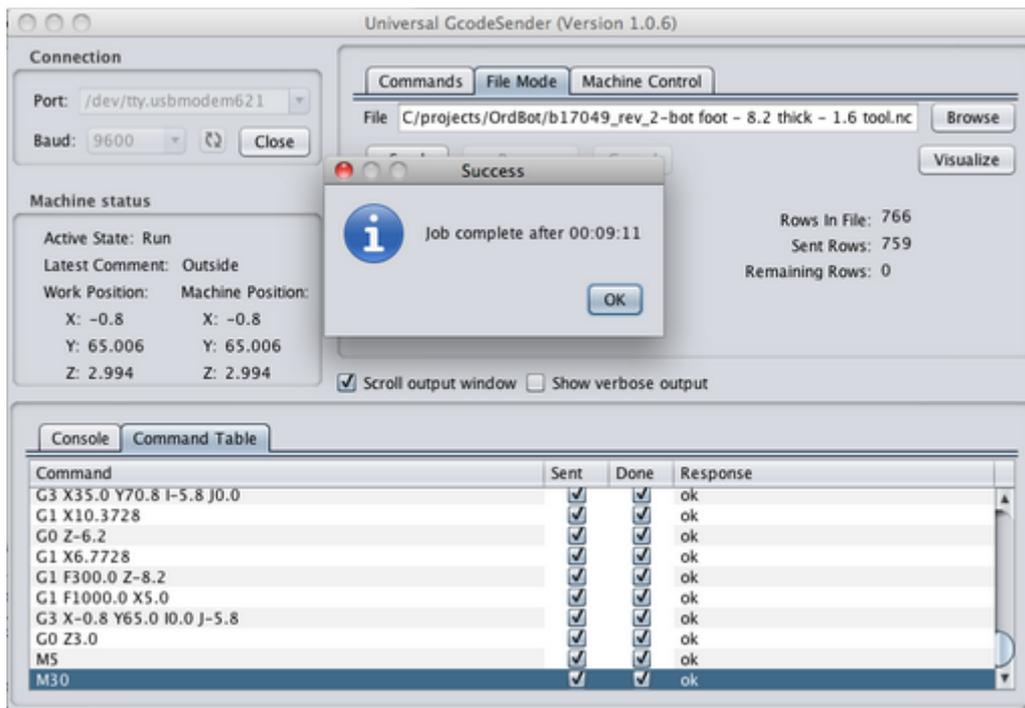
Por otra parte, está Mastercam, cuya pantalla principal es la que se observa en la figura 2.30.



*Figura 2.30. Pantalla principal de Mastercam X7.*

*Fuente: Mastercam Internacional*

Con el software CAM seleccionado, se puede proceder a determinar una alternativa para hacer uso de un procesador de código G. En este caso, una de las herramientas más comúnmente utilizadas es GRBL. Este es un procesador de código G que se instala en la tarjeta electrónica Arduino, funciona con un programa en la computadora que envía el código G mediante Serial. A continuación, en la Figura 2.31, se indica una captura de pantalla del programa en mención, este programa se conoce como G Code Sender.



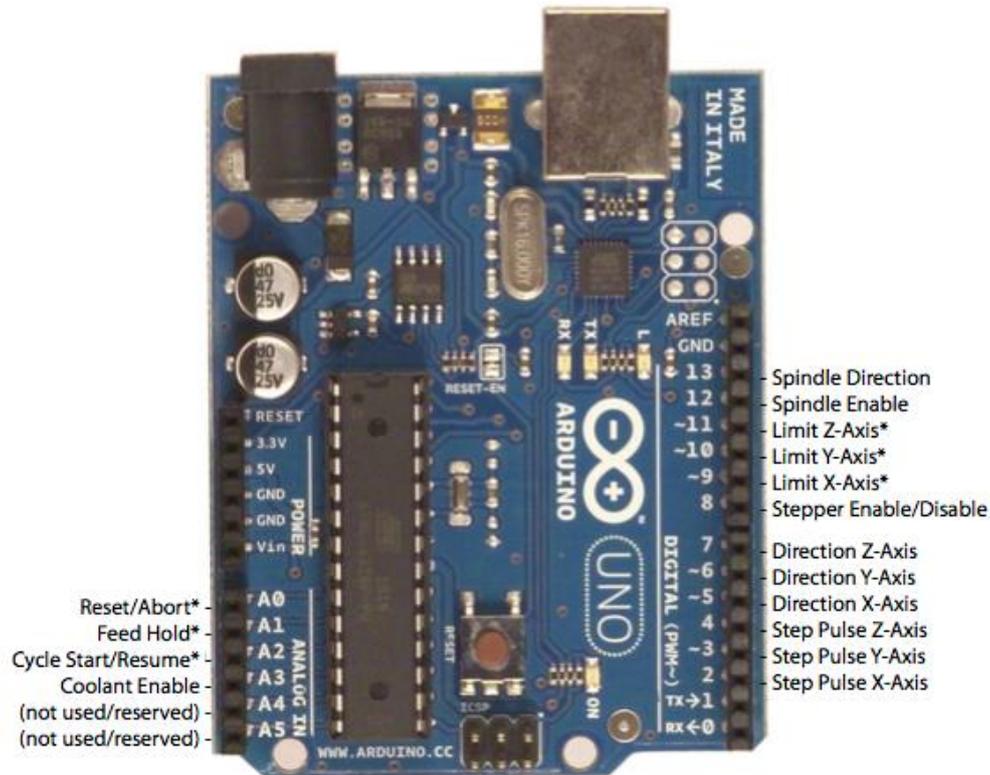
*Figura 2.31. Pantalla principal del programa G Code Sender.*

*Fuente: tomado de Google Imágenes.*

## 2.7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

Para realizar el control automático y semi automático de la máquina existen algunas alternativas,

Con este antecedente, se procede a verificar cual es la estructura de conexión que se requiere en la tarjeta Arduino, para esto, se hace uso de la hoja de datos del programa GRBL. En la figura 2.32, se indica cual es la estructura de conexión de la tarjeta de control.



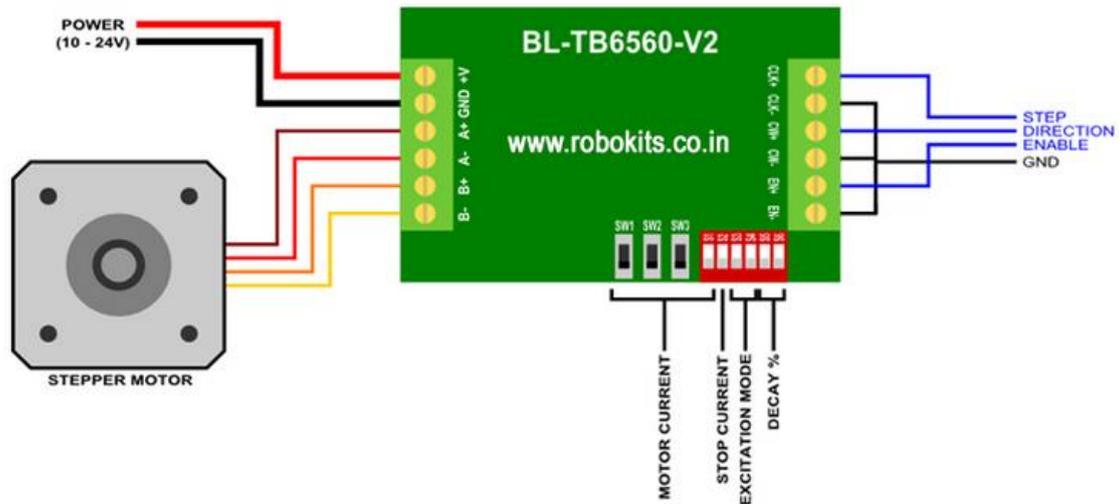
\* - Indicates input pins. Held high with internal pull-up resistors.

**Figura 2.32.** Estructura de conexión de la tarjeta Arduino para el control del modo CNC.

**Fuente:** GRBL Github

Como se puede observar, hay gran cantidad de posibilidades con este programa, se pueden controlar los motores de los 3 ejes – en caso de que la máquina los tuviera – se pueden también controlar los fines de carrera de los ejes, el motor principal y demás. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, al hacer uso de Mastercam, este software genera una lista de códigos que en algunos casos no pueden ser procesados por el programa GRBL. Razón por la que es importante partir de lo más básico, es decir, el control de los ejes.

Ahora bien, se indicó anteriormente que se van a tener 3 diferentes modos de control de la máquina, el manual, el semi automático y el automático. Para el modo automático, el esquema de conexión entre el arduino y los módulos es bastante sencillo, esto se puede observar en la Figura 2.33

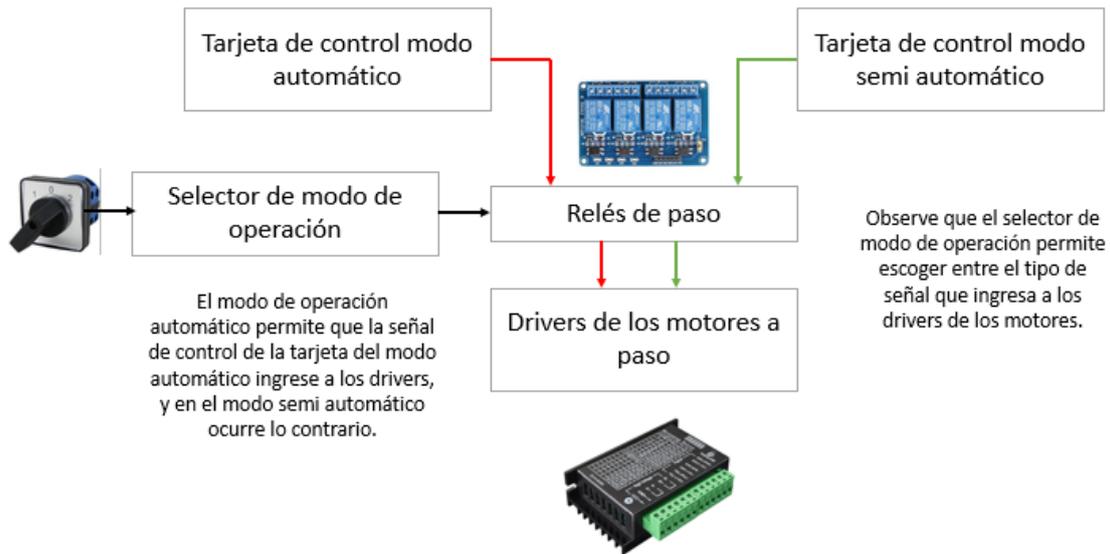


**Figura 2.33.** Esquema de conexión del modo automático.

*Fuente: GRBL Github*

En la imagen, los 4 cables que están en la derecha, son los que van conectados al arduino, dependiendo del eje que se vaya a controlar. Aquí es donde hay que poner un botón de parada de emergencia, puesto que es importante considerar que el sistema de control solo va a tener un módulo por motor, lo que implica que, en el modo automático, los cables de control irían direccionados a una tarjeta de control, mientras que en el modo semi automático los cables deberían ir direccionados a otra tarjeta de control diferente y además, en el modo manual, los motores deberían tener una desconexión total entre las bobinas y las tarjetas de control. Para entender esto de una mejor manera, observar la Figura 2.34.

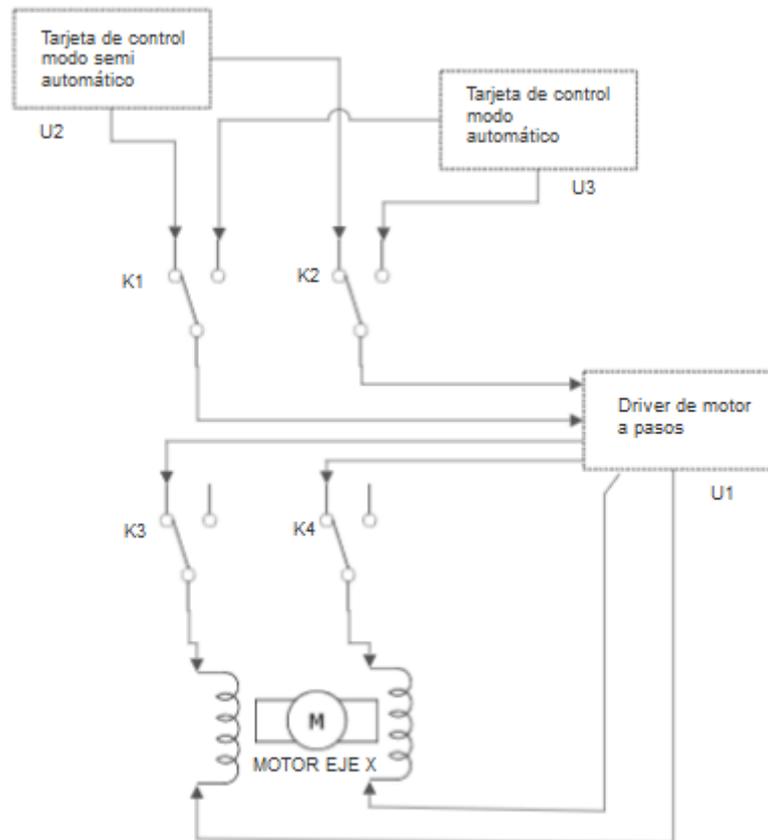
En la Figura 2.34, se indica que, si el selector de modo de operación se encuentra en estado automático, la tarjeta de control de modo automático se conecta a los drivers de los motores a paso, ocurre lo mismo, pero para el modo semi automático, en este caso, cuando el selector está en modo semi automático, la señal de la tarjeta de control del modo semi automático ingresa a los drivers de los motores a paso. Se debe considerar que solo se utiliza 1 driver por motor y al utilizar 2 motores a paso, el proyecto cuenta con únicamente dos drivers. En el modo manual, ninguna señal de control ingresa a los drivers de los motores a paso.



**Figura 2.34.** Esquema de conexión de las tarjetas de control de la máquina con los drivers de los motores.

La idea de incorporar un modo manual, se debe principalmente a que cuando los motores se encuentran conectados a las tarjetas de control, pero éstas están desenergizadas, al rotar los motores, se genera una fuerza electromotriz que va desde los motores – que en este caso comenzarían a actuar como generadores – hacia las tarjetas de control, esto es un problema, ya que al rotar los motores se produce una fuerza indeseada contraria al movimiento lo cual no permite poder girar los motores con fluidez, en adición a un posible daño sobre las tarjetas de control debido a que la energía fluye directamente a través de los circuitos de potencia.

Para solventar esto, se utiliza el modo manual, que permite lograr que los motores se encuentren parcialmente desconectados entre los drivers y las bobinas de los mismos, esto se ilustra en la Figura 2.35.



**Figura 2.35.** Diagrama de conexión de un motor a pasos con los tres modos de operación.

Nótese que de la figura 2.35, se puede identificar dos tarjetas de control, que son las mismas que se utilizan para el control del motor del Eje Z.

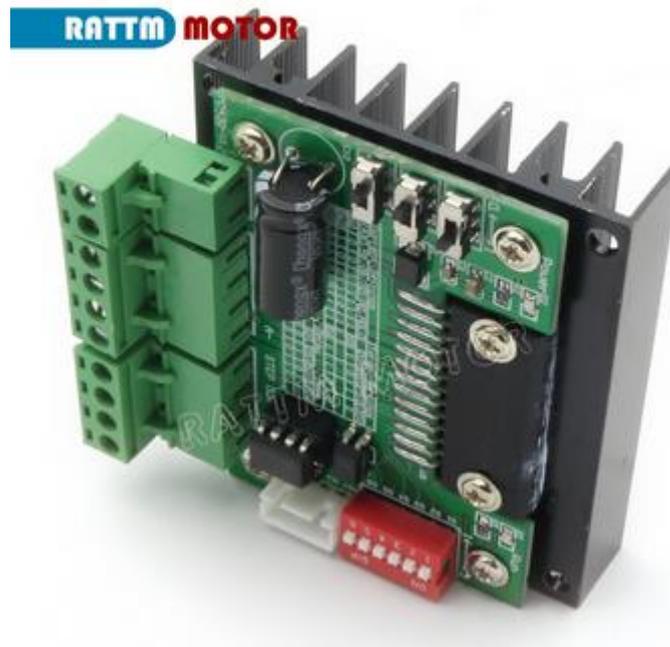
En este punto, se puede avanzar con el diseño de los selectores, que serían aquellos que permitirán seleccionar el modo de control y desviar el control de los motores hacia la tarjeta correspondiente.

Para esto, es importante considerar que los controladores de los motores tienen 4 entradas, a continuación, van detalladas:

- Una entrada de voltaje
- Una señal de dirección
- Una señal de avance
- Una señal de habilitación

Hay algunos controladores de motores en el mercado, sin embargo, el que se utilizará en este proyecto es el TB6560, ver figura 2.36. Este es un controlador

para motores a paso de hasta 3 amperios. Los motores a paso que se dimensionaron, tienen un consumo de 2.9 amperios pico, razón por lo que estos módulos serían suficientes para poder controlar los motores.



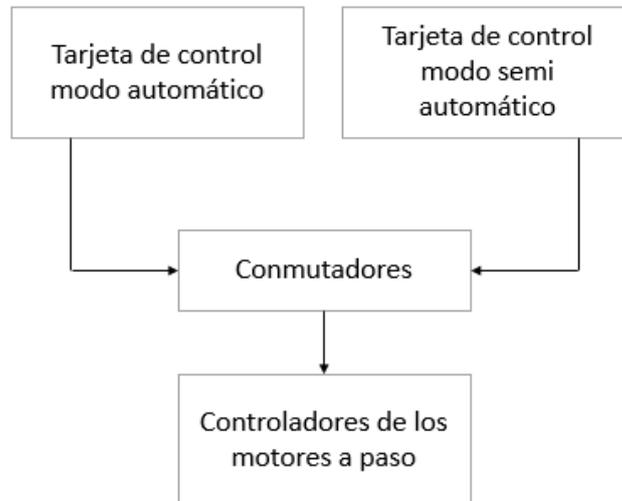
*Figura 2.36. TB6560 controlador de motores a paso.*

*Fuente: tomado de Google Imágenes*

Ya sea bien, este controlador TB 6560 o el TB 6600, cualquiera de los dos maneja las mismas señales de control.

La principal ventaja de estos módulos, es que son bastante sencillos de controlar, permiten controlar la cantidad de corriente que se envía a los motores y demás, sin embargo, la desventaja que tienen, es que el pin de habilitación no desconecta los motores de las tarjetas de control, por lo que únicamente el pin de habilitación no podría ser utilizado para realizar el control manual.

Por esta razón, es importante incluir una serie de selectores que permitan controlar y direccionar correctamente las señales de control hacia los módulos, en palabras simples, esto se puede observar en la figura 2.37.



**Figura 2.37.** Esquema básico de control de los motores con dos tarjetas de control.

Con esto dicho, es importante tener en cuenta que tipo de selectores podrían ser utilizados aquí, comercialmente hay muchos de ellos, y más comúnmente son utilizados los relés de 110 voltios para los tableros de control, ver figura 2.38.



**Figura 2.38.** Relé 110 voltios doble contacto.

**Fuente:** Amazon Imágenes

Es importante tener en cuenta que las placas de control manejan voltajes bajos, máximo 5 voltios, y éstas tarjetas son las que deben activar o desactivar algunas parejas de relés, lo cual implica que se debe hacer un circuito adicional de

acondicionamiento de la señal para que las tarjetas de control puedan activar los relés.

Estos relés son también costosos, se venden por cerca de 10 dólares cada uno de ellos.

Por otra parte, hay la posibilidad de utilizar relés de mucho menor voltaje que vienen con circuitos de aislación, muy convenientes para esta aplicación – considerando el posible nivel de ruido electromagnético que pudiese generarse – por esta razón, estos relés, que generalmente vienen soldados sobre una placa electrónica en conjuntos pares, 8 relés, 4 relés y 2 relés son todos de 1 contacto, ver figura 2.39.

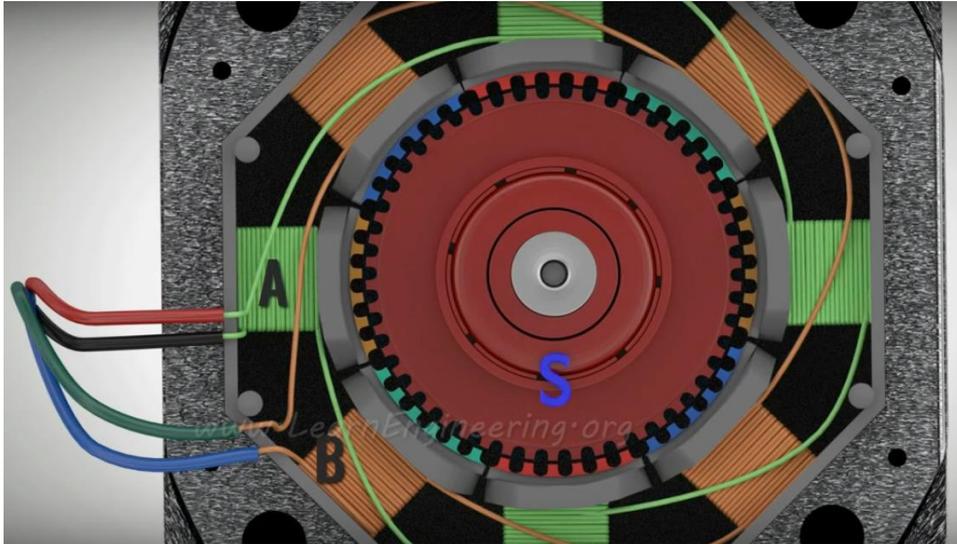


*Figura 2.39. Bloque de relés de 1 contacto, activación con 5VDC.*

*Fuente: Amazon Imágenes.*

Aquí hay precisamente 8 parejas de relés, los mismos que serían ideales para poder utilizar todas las líneas de señal que requieren los módulos de control de los motores. Es importante mencionar, que, para el desacoplamiento de los motores, sería necesario otro conjunto de relés; los motores que se estarían utilizando en los ejes, son motores bipolares con ocho bobinas por motor, pero con dos líneas de alimentación por cada 4 bobinas, es decir, el motor tiene 4 cables. Estos conjuntos de bobinas son los que generan una fuerza electromotriz al girarlos, y en consecuencia no es necesario abrir las 4 líneas de alimentación de los motores a paso sino únicamente una línea de cada conjunto de 4 bobinas.

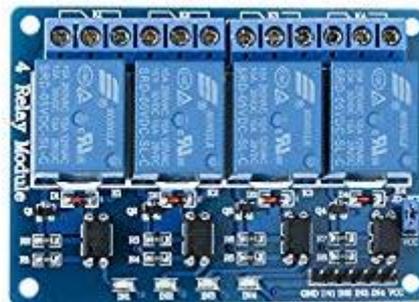
En la figura 2.40, se indica un esquema de la estructura interna de los motores que se están utilizando.



**Figura 2.40.** Estructura de los motores a paso que se están utilizando en los ejes.

*Fuente:* Amazon Imágenes.

Los selectores que se utilizarían para este control de los motores, que prácticamente, vendrían a ser los responsables de la habilitación / deshabilitación de los motores, son los que se indican en la figura 2.41.



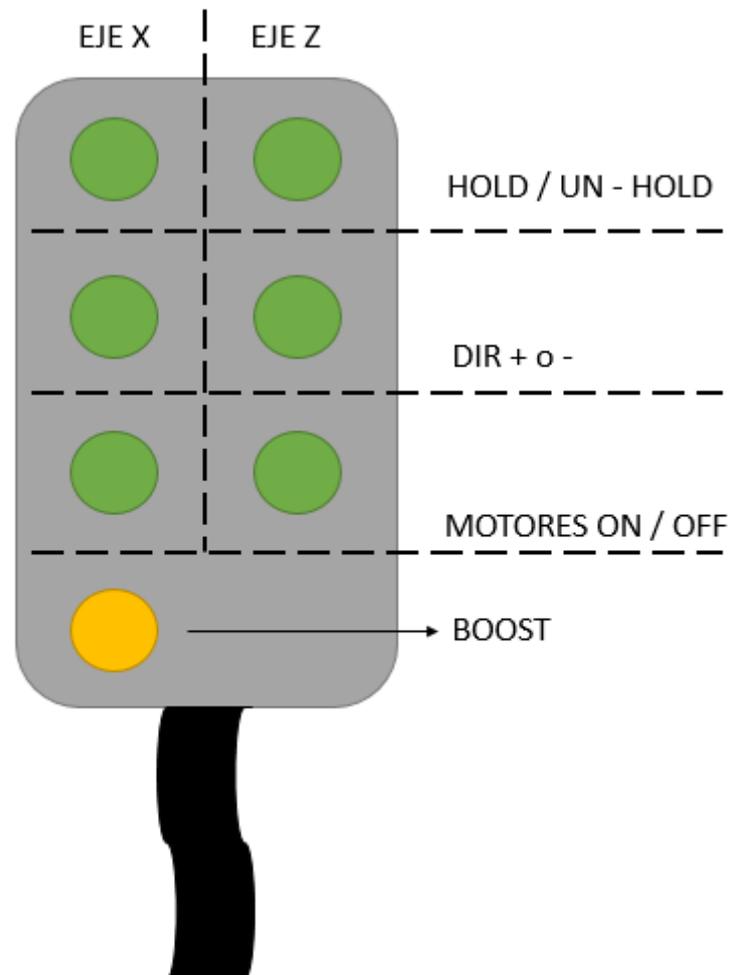
**Figura 2.41.** Módulo de 4 relés de 1 contacto que sería utilizado para la habilitación de los motores de los ejes.

*Fuente:* Amazon Imágenes.

Hasta este punto se han seleccionado los selectores, los controladores de los motores y la tarjeta de control del modo CNC, es importante mencionar que la tarjeta de control del modo semi automático, por facilidad de programación será de igual forma una tarjeta Arduino, con estas tarjetas hay gran cantidad de accesorios, inclusive, se venden unos adaptadores que permiten colocar al

Arduino directamente al tablero de control sobre un riel DIN. Esto facilita mucho el montaje.

Para el modo semi automático, en base a la voz del usuario, se requiere algo que sea fácil de manejar, versátil y poco costoso. Por esta razón se ha decidido implementar un mando de control, que se indica en la Figura 2.42, el mismo que permitirá realizar un control directo sobre los ejes de la máquina.



*Figura 2.42. Estructura del mando propuesto.*

Nótese que el mando que se pretende incorporar, tiene 7 botones, 3 para el eje Z, 3 para el eje X y un botón adicional denominado “boost”. La idea de utilizar 3 botones para cada eje, es precisamente poder utilizar la máquina tanto de forma manual como automática:

- Los botones HOLD:

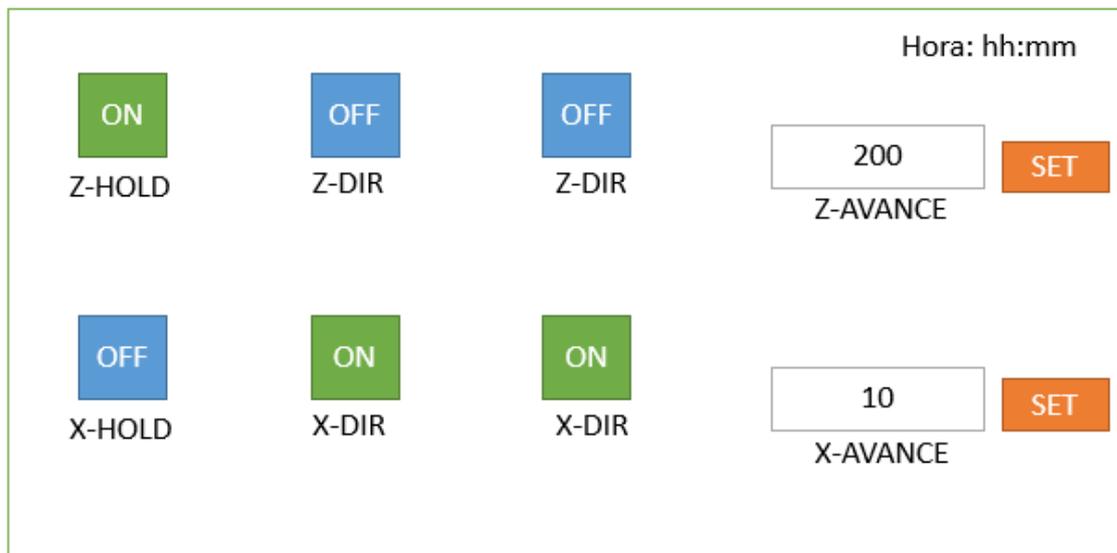
- Permitirán activar o desactivar los motores, es decir, conectarlos o desconectarlos físicamente de los módulos de control.
- Con esta desconexión física, se pretende poder rotar las perillas de la máquina libremente sin que se generen fuerzas contrarias al movimiento de rotación generadas por la corriente generada por los motores.
- Los botones DIR:
  - Eventualmente permitirían escoger entre dirección positiva y negativa.
  - La idea es que esto no pueda ser cambiado durante el movimiento de la máquina.
- Los botones ON / OFF
  - Son los que encienden o apagan los motores de los ejes.
  - Se pretende que el mando no permita activar los dos motores de manera simultánea.
- El botón Boost
  - Este botón permite hacer que el movimiento de un eje vaya a su velocidad máxima.
  - El objetivo de esto, es que, si se configura el avance de un eje, asumiendo una operación de acabado a 10 mm / min, al realizar una operación de cilindrado de una cierta longitud, no se tenga que esperar que la máquina retorne a esa velocidad tan lenta, sino que se pueda aprovechar de mejor manera el tiempo de retorno de la torreta.

Es importante indicar que todos los botones son de estado ON / OFF, es decir, de dos posiciones.

Finalmente, se debe determinar cuáles son las mejores opciones para elaborar un HMI; cuando la máquina está operando en el modo semi – automático, el HMI tiene una gran importancia, puesto que permitiría ver cuales botones están

encendidos y además de eso, se requiere que el HMI permita ingresar los datos de la velocidad de avance para el control del modo semi automático.

El esquema general del HMI del modo semi automático, es el que se indica en la figura 2.43.



**Figura 2.43.** Estructura del HMI para el modo semi automático.

Nótese que mediante el HMI que se muestra en la imagen superior, se puede ingresar los datos de avance para cada uno de los ejes por separado, y adicionalmente, se puede visualizar el estado de cada uno de los botones.

Con la estructura del HMI definida, es importante tomar en cuenta que hay limitadas opciones para poder hacer esta tarea. Si bien es cierto, en el mercado hay gran cantidad de HMI que son comerciales, su precio es bastante alto, por ejemplo, el HMI que se observa en la Figura 2.44, sería una opción bastante buena para este proyecto.



**Figura 2.44.** HMI Autonics, ideal para el proyecto.

*Fuente:* Amazon Imágenes

Pese a que este es un dispositivo de índole industrial que tiene gran robustez en cuanto a interferencias y a un uso moderado, su costo es equivalente, ya que a pesar de no ser una marca tan ampliamente conocida como Siemens, su costo asciende sobre los 700 dólares, por esta razón resulta imposible hacer uso de un HMI de este tipo, ya que como éste, sus equivalentes, o incluso inferiores en tamaño, tienen un precio similar.

Otra posible opción, es hacer uso de una raspberry pi, esta tarjeta, que se observa en la figura xx, es una mini computadora, por supuesto que no es de carácter industrial ni mucho menos es comparable con el HMI que se indica en la Figura 2.44, sin embargo, para la función que cumpliría, podría ser bastante aplicable a este proyecto.



**Figura 2.45.** Raspberry Pi 3, posible aplicación como HMI del modo semi automático.

**Fuente:** tomado de Google Imágenes

La ventaja que tiene esta tarjeta, es que permite conectar un pequeño teclado, por donde se podrían ingresar los datos del avance mecánico que se quiere modificar. Su costo es bastante accesible, ya que se la puede encontrar en tiendas desde un valor de 35 dólares, adicional a esto, para visualizar la información, se podría utilizar un simple monitor – que incluso puede ser reciclado – para visualizar la información en pantalla.

Es evidente que, para poder utilizar el mando, se deberá hacer algún tipo de conexión mixta entre el Arduino, que sería la tarjeta que controla los motores en el modo semi automático, y la raspberry pi, que actuaría como HMI para esto hay que diferenciar los voltajes con los que trabajan ambas tarjetas, ya que, por su parte, la raspberry trabaja con 3.3 voltios, mientras que el arduino trabaja con 5v.

Finalmente, habrá que hacer un diseño robusto de un circuito electrónico que permita atenuar, en la medida de lo posible, las interferencias que se generarían debido a la antena.

## CAPÍTULO III

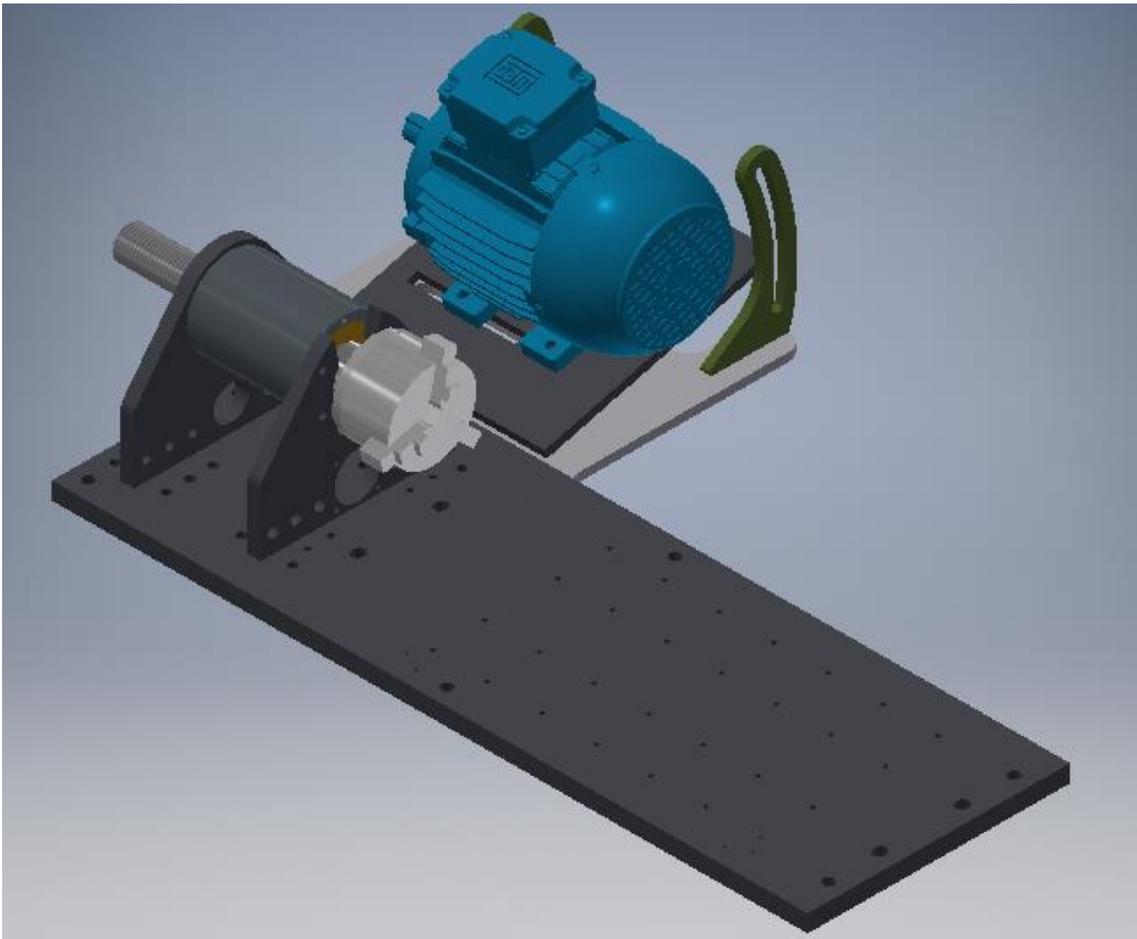
### 3. DISEÑO DEL TORNO DE CONTROL NUMÉRICO

En este punto, con todas las alternativas seleccionadas, se procede a realizar el diseño de los componentes seleccionados.

#### 3.1. BOSQUEJO DEL PROTOTIPO

Como se indicó en el apartado número dos del presente documento, la mejor opción para realizar la bancada de la máquina, es precisamente una plancha de acero comercial A-36, cuyo costo es bastante accesible, y además es fácil de mecanizar.

Sobre esta plancha iría montado el conjunto del husillo, las guías lineales con los respectivos rodamientos y el motor. En la figura 3.1, se muestra un esquema de la máquina, el lugar donde iría ubicado el motor, las guías lineales y el conjunto del husillo.



*Figura 3.1. Esquema general de la estructura base del torno.*

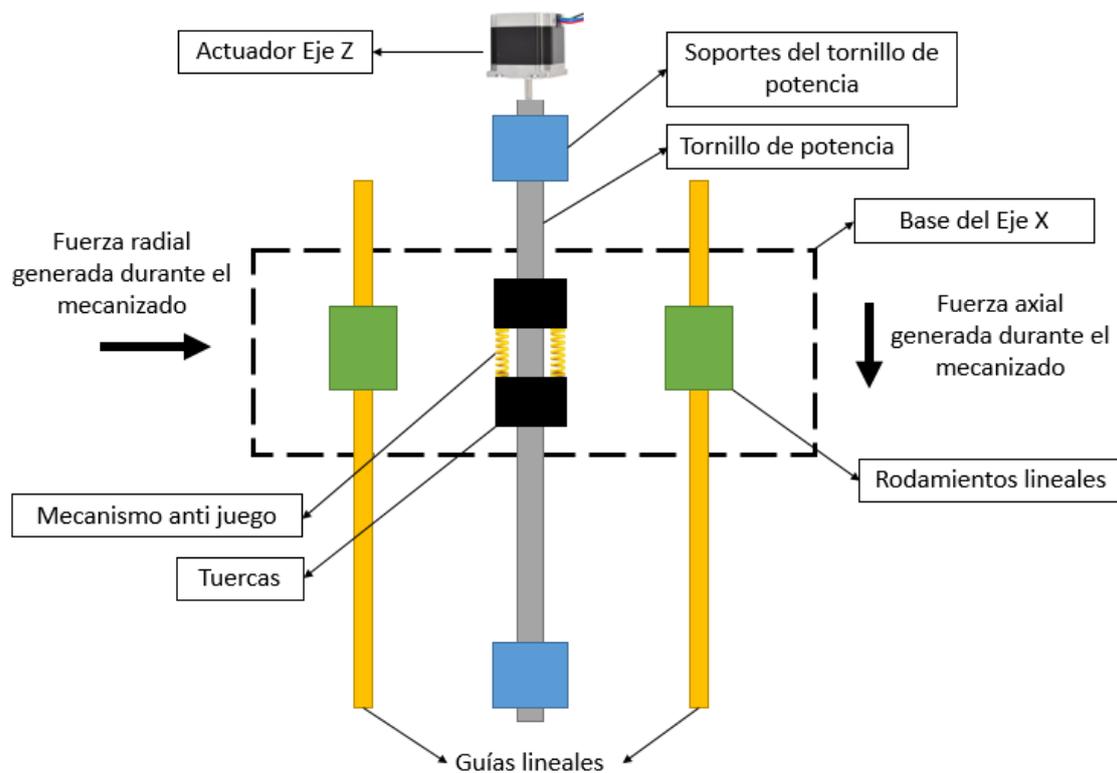
Nótese que, en la imagen mostrada, se indica la ubicación del motor y la ubicación del conjunto del husillo.

Aquí es muy importante mencionar, que lo que se busca en esta máquina es tratar de reducir la vibración en la medida de lo posible, y adicionalmente lograr la mayor rigidez posible, para poder alcanzar esto, es imprescindible garantizar que los componentes mecánicos y los que se encuentran en movimiento estén lo más próximos posible a la base de la máquina, con esto, se garantiza que los momentos que se generan durante el mecanizado, puedan ser absorbidos de la mejor forma posible.

El primer paso en este punto, gira en torno a la colocación de los tornillos de potencia, puesto que, sobre estos, y en conjunto con las guías lineales, recae la mayor responsabilidad.

Hasta aquí hay un punto particular que no se ha mencionado, y es precisamente el de los soportes de los tornillos de potencia. Estos soportes, tienen que ser

tremendamente rígidos, tienen que soportar todas las fuerzas que se generan durante el mecanizado. Sería ideal poder fabricar un par de mecanismos que sean específicamente diseñados para este propósito, ya que los mismos deben ser bastante precisos. Observar la Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Estructura base del mecanismo de encaje lineal y transmisión de potencia del Eje Z.

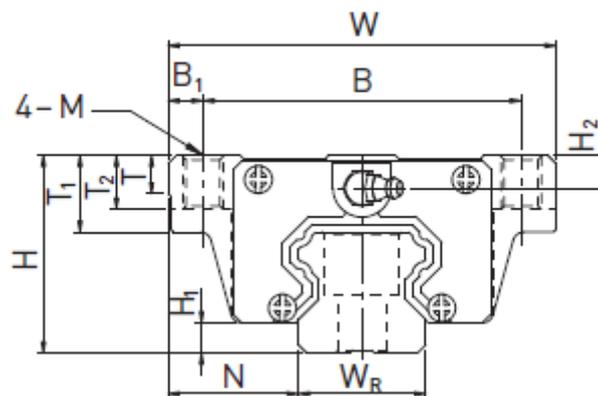
En la Figura 3.2, se encuentra un bosquejo bien explicado sobre la estructura que se pretende lograr con las guías y los tornillos de potencia. Como se puede observar, los mecanismos que garantizan que todas las fuerzas radiales – que puedan ser generadas en cualquier dirección – sean absorbidas, son las guías lineales.

En la Ecuación 1, se realizó una aproximación sobre la fuerza que se genera durante un proceso de mecanizado, se indicó que, para una operación habitual de mecanizado, se pueden generar fuerzas de 374 N, tomando esto como una aproximación se puede determinar el tipo de guía lineal que se puede utilizar aquí.

Las guías lineales más pequeñas, soportan cargas de máximo 5 kN, sin embargo, por tratarse de mecanismos pequeños, no poseen retenedores para el control de viruta. En las guías de maquinaria, las más pequeñas, que son de 15 milímetros, soportan una carga de 11.38 kN, y su costo es apenas 5% inferior a las guías lineales de 20 milímetros, mismas que soportan una carga de 17.750 kN por guía.

Por esta razón, se escogen las guías lineales de 20 milímetros como las preferidas para el movimiento lineal. Estas guías son específicamente diseñadas para maquinaria, tienen fuertes y robustos retenedores que garantizan una larga vida útil de los rodamientos, considerando que la viruta es metálica, y por consecuencia es más abrasiva que en otros casos.

En la Figura 3.3, se indica las cotas principales de un rodamiento lineal, sin embargo, ahorita nos enfocaremos únicamente en una de ellas, la altura. La dimensión H que se indica, para este modelo de riel – y según el fabricante - es de 30 milímetros.



**Figura 3.3.** Dimensiones generales de las guías lineales ensambladas.

Fuente: Catálogo Hiwin

Sería ideal poder colocar todos los mecanismos a esa altura base de 30 milímetros, considerando que, si se realiza un mecanizado en el extremo del eje X, cuya longitud sería de aproximadamente 200 milímetros, y adicionalmente, a una altura desde la cuchilla hasta la base donde se encuentran soportadas las guías de cerca de 150 milímetros, realizando un mecanizado tangencial, se pueden generar momentos de hasta 93 N – m. Ventajosamente, las guías que se seleccionaron soportan bajo esas condiciones, momentos de hasta 270 N –

m. Y a eso, adicionalmente, que se debe considerar que se han colocado dos guías lineales y los 270 N – m, equivalen a una sola guía colocada.

Hasta este punto, se afirma que las guías seleccionadas, podrían soportar sin ningún inconveniente las cargas que se generan durante el mecanizado, sin embargo, de acuerdo con lo que se indica en la Figura 3.3, durante el proceso de mecanizado, se generan también fuerzas axiales, las mismas que deben ser soportadas por los asientos de los tornillos de potencia, y evidentemente por los tornillos de potencia también.

Como se indicó anteriormente, hubiera sido ideal poder realizar unas bases para los tornillos de potencia, de forma que estos puedan asentarse con total precisión, utilizando rodamientos de contacto angular y demás, sin embargo, fabricar estas bases encarecería el costo de exponencialmente, ya que se deberían fabricar 4 bases de alta precisión.

Por esta razón, se deben buscar otras alternativas para seleccionar las bases, y, de hecho, las más económicas y robustas, son las chumaceras. La figura 3.4 indica una chumacera de media pulgada, sumamente comercial y económica, que tiene un rodamiento oscilante de bolas. Esta chumacera puede soportar fuerzas axiales de hasta 6.65 kN según el catálogo de especificaciones técnicas.



**Figura 3.4.** Chumacera de piso de media pulgada de diámetro.

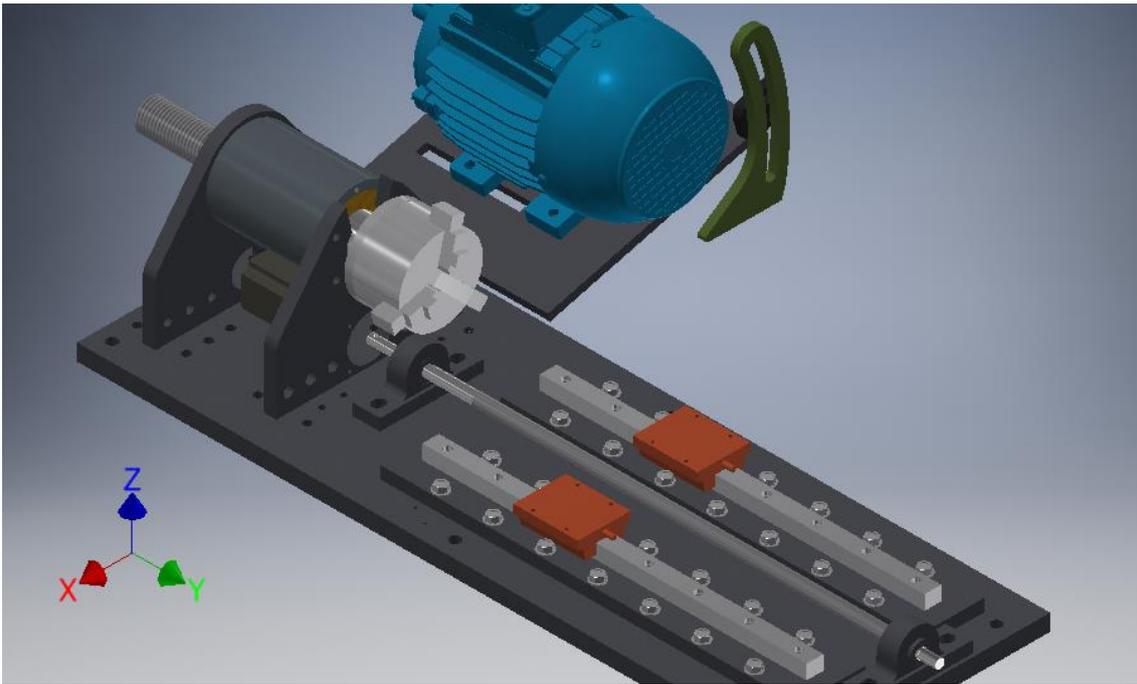
**Fuente:** tomado de Google Imágenes.

Si esta chumacera soporta esas cargas, entonces al colocar dos de ellas, considerando que son dos soportes del tornillo de potencia, se podría indicar que aproximadamente se tendrían firmes soportes que resistirían cerca de 13 kN de carga axial. No se menciona la carga radial, puesto que es despreciable en referencia a la carga axial ya que es absorbida por las guías lineales, y, además, la carga radial que soporta esta chumacera duplica el valor de la carga axial que soporta.

Efectivamente, la primera desventaja de utilizar las chumaceras, es que éstas tienen una gran altura, entre la base y el eje de rotación. Para el caso de la chumacera de la figura 58 la altura desde la base hasta el eje de rotación es de 30.2 milímetros, es decir, de entrada, ya es superior a la altura total de las guías montadas, cuya altura era de 30 milímetros luego del ensamblaje.

Por esta razón, se debe montar las guías, a una mayor altura, y esto se lo debe realizar sin comprometer la estabilidad de la base, ya que sobre estas guías irán montados los mecanismos que soportarán el eje X.

Observar la Figura 3.5, allí se indica un modelo que se puede utilizar para incrementar de forma segura la altura de las guías lineales sin comprometer la rigidez de la máquina.

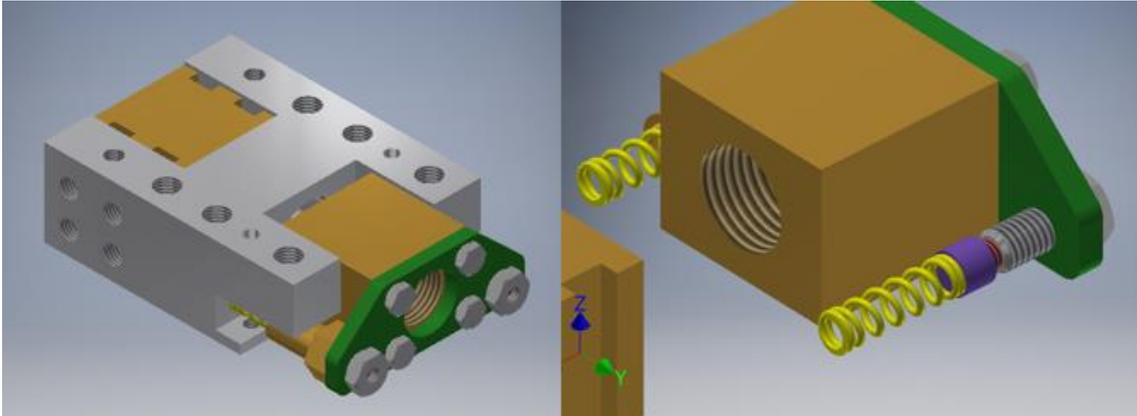


*Figura 3.5. Bases de las guías lineales montadas.*

Nótese que el ensamblaje de las chumaceras obligó a incrementar la altura sobre las que va montadas las guías lineales. Ventajosamente, las bases que se colocarían debajo de las guías lineales son igualmente cortadas en plasma y son de acero A-36 por lo que es bastante sencillo fabricarlas, además de que vienen de alturas específicas.

En este punto, considerando que los tornillos ya tienen una posición definida, se procede a determinar algún tipo de mecanismo que permita eliminar el juego en los tornillos de potencia. Para esto, es importante tomar en cuenta que los tornillos de potencia serán mecanizados en base a los requerimientos de la máquina.

El sistema que se ideó, es el que se indica en la Figura 3.6. Este mecanismo permite asegurar que las tuercas estén aprisionadas contra los extremos.



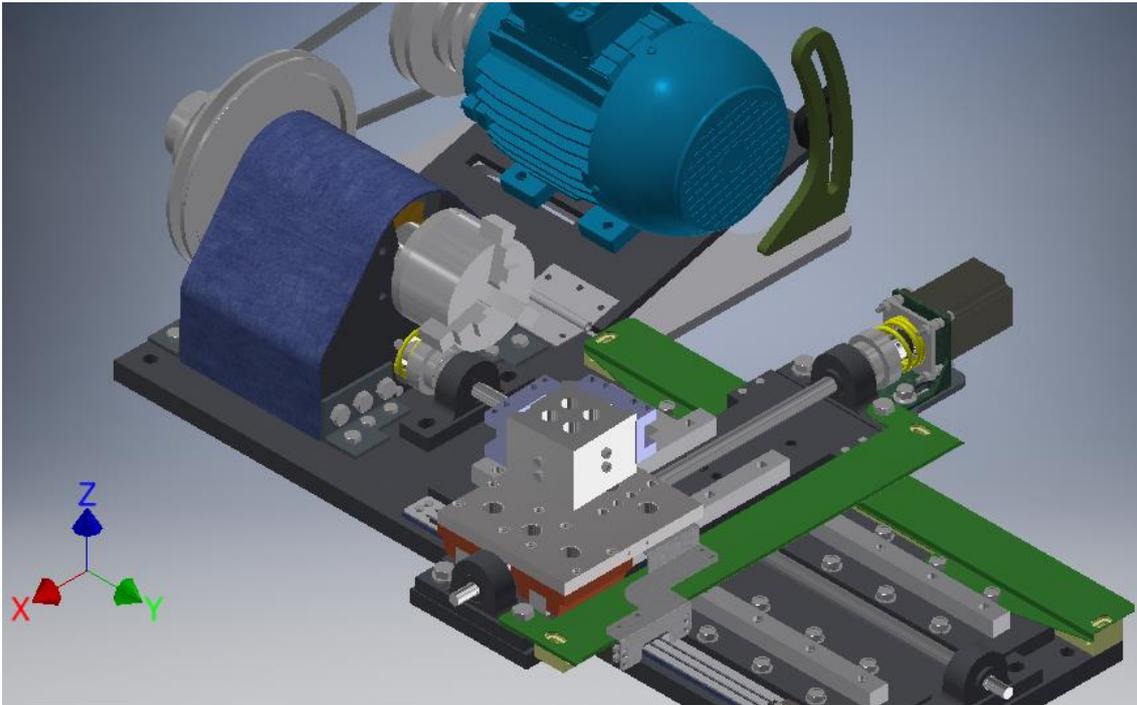
**Figura 3.6.** Mecanismo de eliminación de juego mecánico para los tornillos de potencia.

Este mecanismo, utiliza dos resortes, estratégicamente ubicados, que están actuando en compresión. Es muy importante notar que los resortes deben actuar en compresión y no en tensión ya que, al actuar en tensión, quedan aprisionados hacia la parte interna del mecanismo, logrando que cualquier fuerza que se genere durante el mecanizado, empuje hacia afuera el mecanismo haciendo que el sistema quede sin efecto.

Para elaborar este complejo mecanismo, se debe fresar una pequeña estructura metálica en forma de letra “H”, en donde se soportarán dos tuercas de bronce dulce – que es el bronce más suave – sin embargo, tiene buenas propiedades mecánicas, es específicamente utilizado para estos propósitos ya que evita que se genere un desgaste en el tornillo, sino, en la misma tuerca, cuyo valor de fabricación es muy inferior al del tornillo.

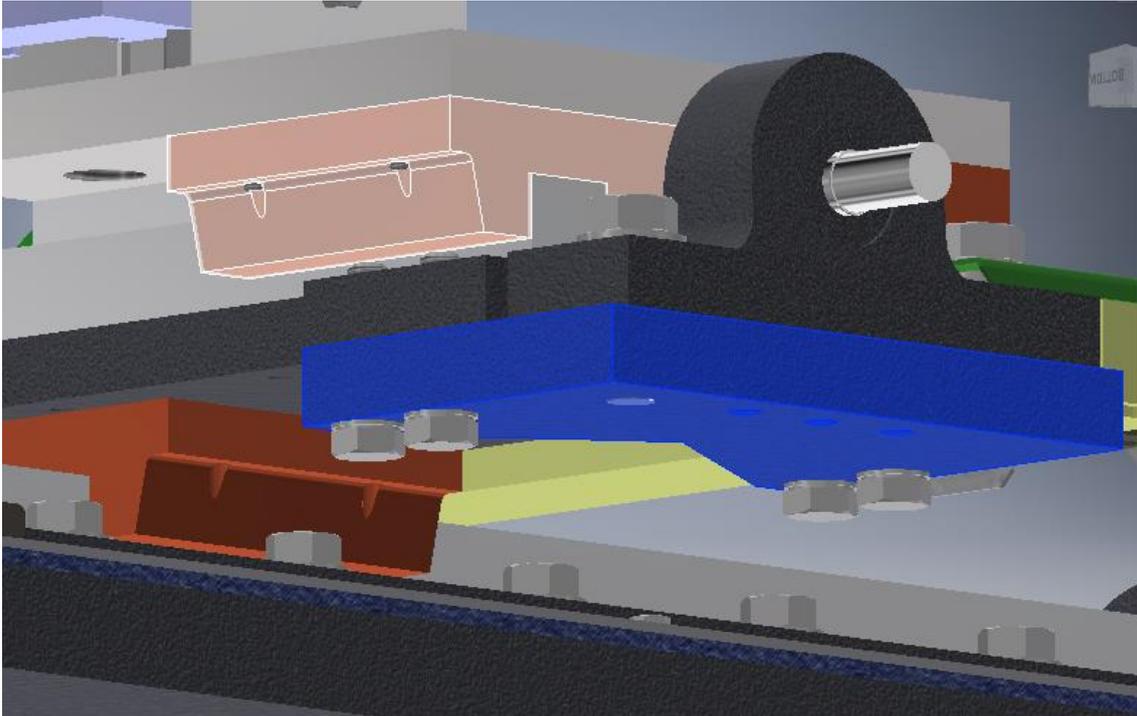
Este mecanismo consta de 17 pequeñas partes que deben ser ensambladas con cautela. La idea es que la capacidad de aprisionamiento del mecanismo sea regulable, ya que lo que menos se busca es que los motores que controlan los ejes generen un sobre esfuerzo al rotar. Para lograr esto, se utilizan dos prisioneros que ajustan o aflojan la compresión de los resortes, logrando dejar prácticamente el mecanismo sin efecto, ligeramente ajustado o muy ajustado.

Avanzando un poco más con el montaje de los elementos y utilizando el mismo tipo de mecanismo para el tornillo de potencia del eje X, se muestra en la Figura 3.7 un montaje bastante avanzado de la máquina.



*Figura 3.7. Montaje finalizado de la máquina.*

Es importante notar que hay una gran ventaja que tiene el eje x que precisamente no tiene el eje Z, y en este caso, es que las chumaceras que van montadas sobre el eje X fueron montadas en platinas que están colocadas en la cara inferior de la base del eje X, garantizando que la altura del tornillo de potencia sea la mínima posible. Lo que aquí se indica se puede observar en la Figura 3.8.



**Figura 3.8.** Montaje de las chumaceras sobre una plancha de acero sujeta a la cara inferior de la base del eje X.

Es importante tomar en cuenta que todas las planchas metálicas que se utilizan en el ensamblaje son de una plancha de 15 milímetros que se compraría entera para poder fabricar todas las estructuras.

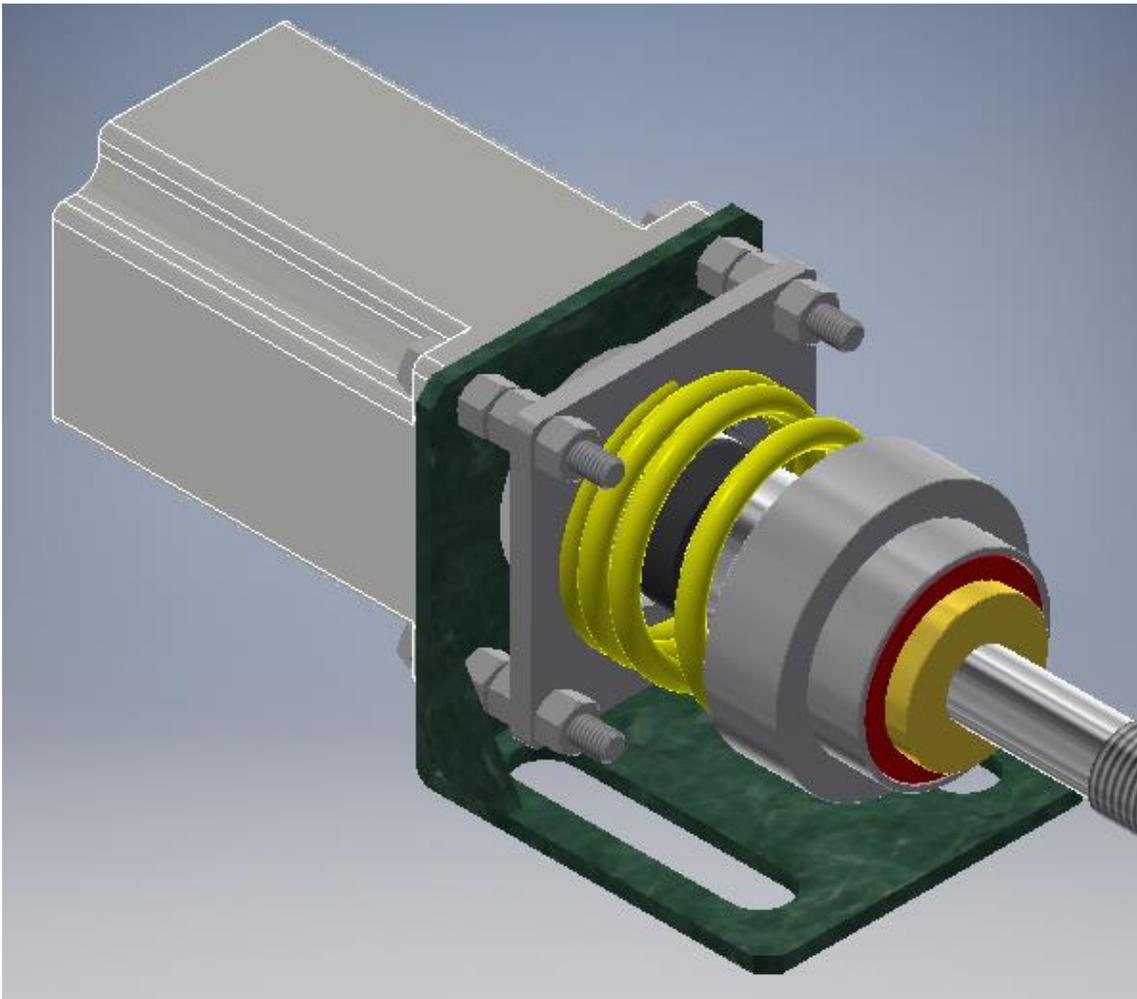
Hay un mecanismo bastante importante que se debió implementar, cuya justificación se soporta en las conclusiones, que sirve para eliminar el juego de los apoyos de los tornillos de potencia.

A pesar de que las chumaceras que se escogieron, soportan sin ningún problema la carga a la que se les está sometiendo, tienen un grave problema. La estructura de las chumaceras, es hecha de fundición, por lo que el alojamiento del rodamiento no tiene gran precisión, esto implica, que a pesar de que el rodamiento esté sujeto a las tolerancias descritas en el catálogo, entre la base del rodamiento y el mismo rodamiento se genera un juego mecánico, que en sus peores condiciones puede alcanzar valores de 500 micras de movimiento axial.

Esto es un factor sumamente indeseable, puesto que, con un juego mecánico tan grande, los mecanismos antes implementados para eliminar el juego de los

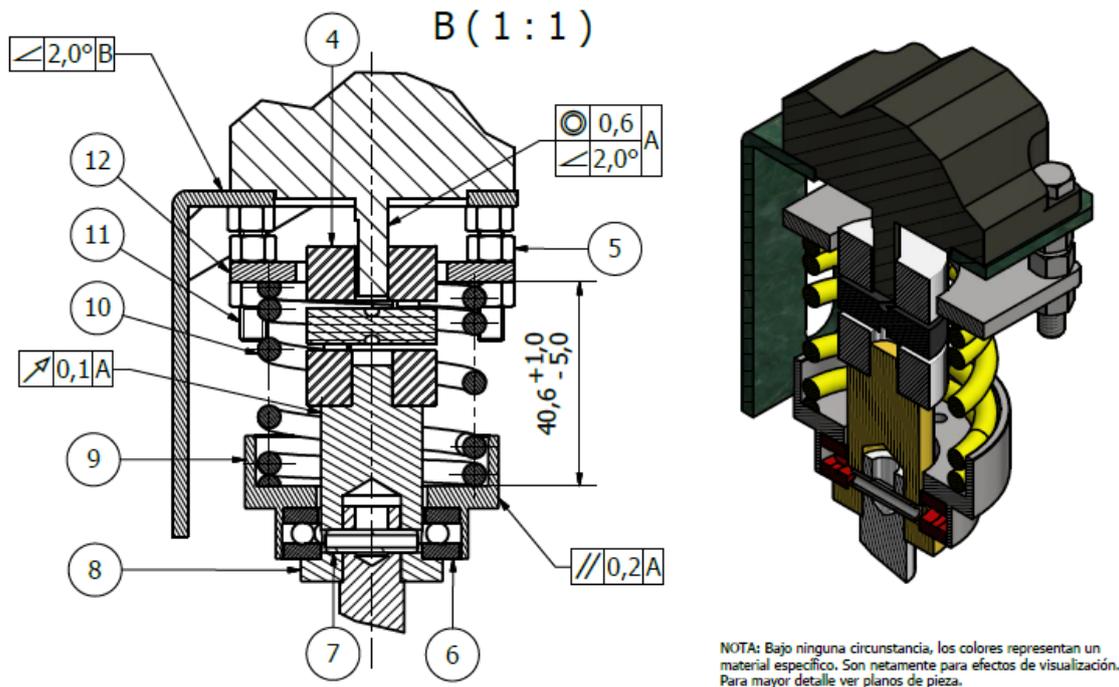
tornillos quedarían prácticamente sin efecto, ya que existe un juego mecánico mucho más grande que haría que estos sean despreciables.

Precisamente por esta razón, se diseñó un complejo mecanismo, que se indica en la Figura 3.9.



*Figura 3.9. Mecanismo de eliminación de juego mecánico en las chumaceras.*

Este conjunto de mecanismos, está complementado por 24 pequeñas piezas que cumplen una función específica, para poder entender mejor el actuar de este mecanismo, se puede hacer referencia a la Figura 3.10, tomada de los mismos planos mecánicos del proyecto.



**Figura 3.10.** Mecanismo de eliminación de juego en los apoyos.

Como se puede observar, este mecanismo hace uso de un fuerte resorte, cuya función principal es la de aprisionar al tornillo de potencia contra sus propios apoyos y realizar esta tarea permanentemente con gran fuerza y con la menor cantidad de rozamiento posible.

El resorte va aprisionado entre la misma bancada de los ejes y soportado en su otro extremo por el tornillo de potencia, es evidente que este mecanismo no debe interferir con las funciones del motor en lo absoluto, además, debe permitir que el mecanismo sea posible de ensamblar.

Todo va soportado mediante una pequeña grada que tiene el tornillo de potencia en uno de sus extremos y adicionalmente, garantiza esto en combinación con un seguro circular que atraviesa el tornillo de potencia de un extremo a otro.

Como la gran mayoría de mecanismos en la máquina, este no es una excepción para que sea regulable, puesto que una fuerte presión generada por el resorte puede ocasionar una deformación permanente en los soportes del motor, o a su vez, generar excesivo rozamiento, lo que dificultaría considerablemente la rotación de los tornillos de potencia.

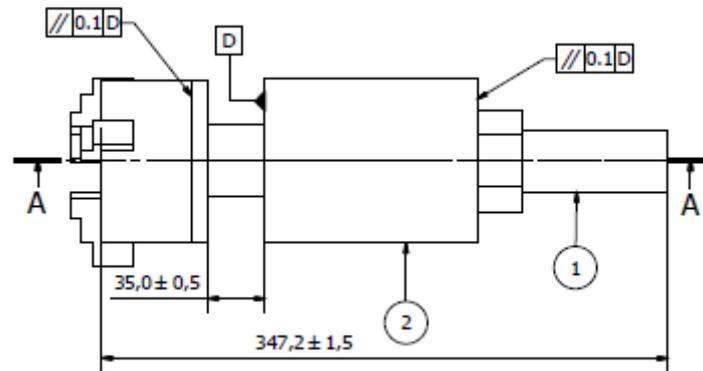
Es un verdadero reto realizar un diseño de este mecanismo, puesto que todos los diseños previos que se realizaron no permitían que se pueda ensamblar, razón por la que todos sus mecanismos debieron ser cuidadosamente seleccionados, y también se debe mencionar que, al utilizar un rodamiento de carga axial de bolas, éste es muy propenso a fallar por la suciedad y las virutas, lo que implica que el sistema debe contemplar esto y asegurar que no puedan ingresar virutas.

Por las propias restricciones geométricas, no se puede colocar un retenedor, ya que el espacio físico entre el eje de rotación y la base del eje X es bastante reducido. Por esta razón se elaboraría esto con un ajuste bastante preciso, entre las partes móviles y las fijas.

### **3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR Y DE COMPONENTES DE LA MÁQUINA**

En este punto con toda la estructura definida, se puede proceder a diseñar los diferentes mecanismos que tiene esta máquina. Se iniciará con el dimensionamiento del motor necesario para realizar el mecanizado de las piezas.

Es importante indicar que, por razones económicas, la elaboración del husillo se vio limitada a ser de ciertas dimensiones, mismas que se indican en la Figura 3.11.



**Figura 3.11.** Dimensiones externas del conjunto del husillo.

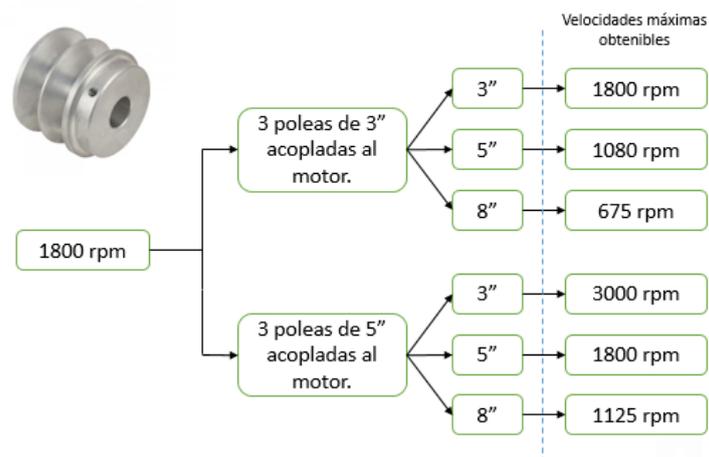
Con este antecedente, podemos proceder a determinar cuál sería la potencia necesaria de motor para poder mover sin mayor dificultad todo el conjunto del husillo. Es importante tener en consideración que dentro de estos cálculos se debe considerar la inercia que tiene todo el conjunto.

Los motores más comerciales son por lo general de 1750 y 3000 revoluciones por minuto, o algo muy próximo a eso. Por diferentes factores, se colocó un cono de poleas en el husillo, de forma que se pueda tener mayor versatilidad en caso de que no se use la máquina con un variador.

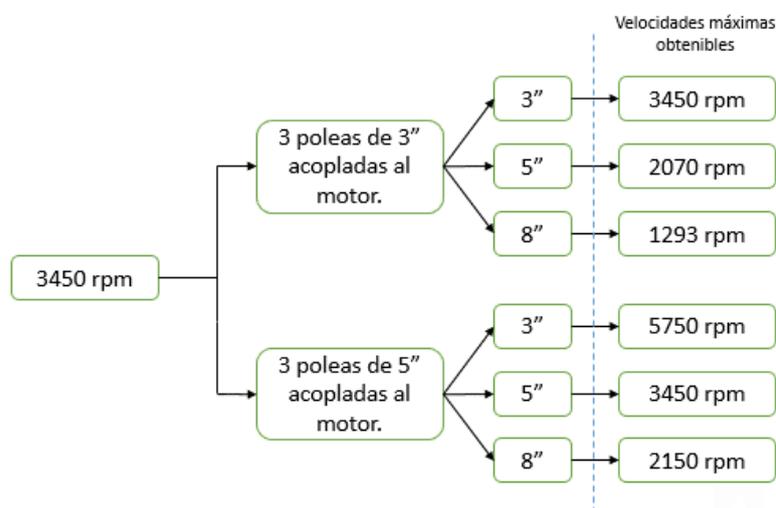
Las poleas que están acopladas en el Husillo, son de 8, 5 y 3.5 pulgadas de diámetro respectivamente. Esto sucedió debido a que en una primera instancia no se decidió utilizar un motor con variador de frecuencia, por lo que la única forma de variar la velocidad del husillo, era mediante el cambio de bandas.

El conjunto de poleas escalonadas del husillo ya está ensamblado, por lo que realizar modificaciones implicaría sobrecostos, tomo esta como la primera restricción para determinar la velocidad ideal del motor.

Se está considerando la posibilidad de realizar un solo cuerpo de 3 poleas escalonadas acopladas al eje del motor. Las poleas que están en el husillo son comerciales y tienen diámetros de 3", 5" y 8", en la Figura 3.12 se indica un árbol que permite visualizar de mejor manera los pros y contras de utilizar un cuerpo de 3 poleas del mismo diámetro acopladas al eje.



**Figura 3.12.** Juego de velocidades posibles con una velocidad de flecha de 1800 revoluciones por minuto.



**Figura 3.13.** Juego de velocidades posibles con una velocidad de flecha de entrada de 3450 revoluciones por minuto.

En base a este árbol, y considerando que la velocidad de husillo durante el mecanizado de desbaste (que se utilizará más ampliamente que el de acabado) no suelen superar las 1300 revoluciones por minuto en los aceros que se ha propuesto mecanizar suena más llamativo tomar la velocidad nominal de 1800 rpm del motor. Sin embargo, utilizando 3 poleas de 3" de diámetro en el motor, se limita mucho las velocidades altas ya que permitiría máximo alcanzar las 1800 revoluciones por minuto; con un motor de 3450 revoluciones por minuto y una relación de 1.5 a 8, el torno trabaja con una velocidad máxima de 1725 rpm y apenas se pueden utilizar insertos considerando que éstos trabajan sobre las 2000 revoluciones por minuto. Por otra parte, utilizando 3 poleas de 5" las

velocidades más bajas del motor oscilan hasta 1125 rpm lo cual aún se puede mejorar, sin embargo, la alta velocidad de 3000 rpm sería muy útil para operaciones de acabado.

Por esta razón sería más conveniente elaborar un cuerpo sólido de 3 poleas que permanentemente estén alineadas con las del husillo con diámetros de 3", 4" y 6".

De esta forma, si se acopla la polea de 3" del motor con la de 8" del husillo se lograría máximo obtener 675 rpm con un alto torque, lo cual me permitiría en un futuro realizar operaciones como roscados o mecanizados en materiales dúctiles donde la velocidad de husillo deba ser baja; la segunda polea del motor sería la de 4" y estaría alineada con la de 5" permitiendo oscilar hasta 1440 rpm como máximo, y finalmente la polea de 6" estaría alineada con la de 3" permitiéndome alcanzar una velocidad máxima de 3600 rpm, ideal para acabados.

En este punto se genera la duda sobre si la polea de 6" sería demasiado grande para acoplar sobre el eje del motor.

En todo caso, para solventar este inconveniente, se podría colocar una polea más pequeña de 5" para que se acople con la de 3" del motor permitiendo alcanzar una velocidad máxima de 3000 rpm.

Esto implicaría colocar idealmente dos poleas de 5" seguidas de una de 3", sin embargo, por motivos de presupuesto, la polea de 3" debe retirarse del ensamble ya que la máquina aún no tiene la programación para realizar roscados y la fabricación de un cuerpo de 3 poleas resulta demasiado costoso.

Una vez obtenida la limitante de velocidad del motor se puede proceder a validar cual es la potencia que se requiere para vencer la inercia de todo el conjunto.

En base a la simulación ya realizada que se indica en la figura 61, se puede determinar que el momento de inercia del conjunto del husillo respecto al eje de rotación es de 16849.364 kg mm<sup>2</sup>, se está agregando la eficiencia de la transmisión por banda aquí y se considera la peor condición que sería la de la polea de 6" hacia la de 3" lo que efectivamente duplicaría el momento de inercia del conjunto. La inercia final queda de 0.0252 Kg\*m<sup>2</sup>.

De acuerdo con la ecuación 2, la fórmula general de la potencia se describe como:

$$P = \tau \times \omega \left| \frac{rad}{seg} \right| \left| \frac{1 rev}{2\pi rad} \right| \left| \frac{60 seg}{1 min} \right| = 9.549 \quad (2)$$

La ecuación 2, sirve para determinar un factor de forma que se pueda aplicar la ecuación de la potencia, pero utilizando una velocidad angular en revoluciones por minuto. Se conoce que el torque por definición equivale al producto de la inercia, multiplicado por la aceleración angular.

$$\tau = i[kg \times m^2] \times \alpha \left[ \frac{rad}{seg} \right] \quad (3)$$

Tomando como base la ecuación de torque que es igual a la inercia por la aceleración angular y esperando que alcance la velocidad nominal del motor en aproximadamente 20 revoluciones, para esto se requeriría que el motor acelere desde una velocidad de reposo de 0 rad/s a una velocidad de 188.5 rad/s (1800rpm) en aproximadamente 0.66 segundos. Ver ecuaciones 4 y 5.

$$\text{Para } 1800 \frac{rev}{min} \left| \frac{2\pi rad}{1 rev} \right| \left| \frac{1 min}{60 seg} \right| = 188.5 \frac{rad}{seg} \quad (4)$$

Se espera que en 20 revoluciones logre su velocidad máxima:

$$20 rev = 20 vueltas = 40\pi \quad (5)$$

Esto implica que se requiere que la maquina alcance su velocidad máxima en:

$$T = \frac{40\pi}{188.5 rad/seg} = 0.66 seg \quad (6)$$

Por definición la aceleración angular, es la diferencia de velocidades angulares por unidad de tiempo. Ver ecuación 7.

$$\alpha = \frac{\Delta W}{t} = \frac{W_f - W_o}{t} \quad (7)$$

Considerando que la velocidad inicial de la maquina es cero, la expresión se reduce a lo indicado en la ecuación 8.

$$\alpha = \frac{W_f}{t} = \frac{188.5 [rad]}{[seg] \times 0.66 [seg]} = 282.76 \frac{rad}{seg} \quad (8)$$

La aceleración angular requerida es de 282.76 rad/s<sup>2</sup>. Lo que implica que el torque requerido para lograr esto es de 7.125 Nm. Despejando de la ecuación 3.

$$\tau = \alpha \times i = 282.76 \frac{rad}{seg} \times 0.0252 kg \times m^2 = 7.125 Nm \quad (9)$$

Finalmente considerando las 1800 revoluciones por minuto del motor se necesita una potencia de 1343W o 1.8 hp. Despejando de la ecuación 2.

$$P = \tau \times \omega = 7.125 Nm \times 188.5 \frac{rad}{seg} = 1343.15 W \quad (10)$$

Nótese que 1 hp equivale aproximadamente a 746 vatios. Con esto se justificaría la compra de un motor de 2 hp de esas características puesto que el principal problema es vencer la inercia, no el mecanizado.

En resumen, el motor ideal para la maquina es un motor de 1800 rpm de 2 hp con 2 poleas acopladas en el eje, ambas de 5”.

Ahora, resta realizar el cálculo de los tornillos de potencia, estos elementos, son sumamente críticos, en términos de que se debe escoger con mucha cautela su paso. El paso de los tornillos en este caso juega un rol fundamental, ya que, con un paso de tornillos más pequeño, la máquina se hace más lenta, pero tiene mayor fuerza de empuje, ocurriendo lo contrario si el paso es más grande.

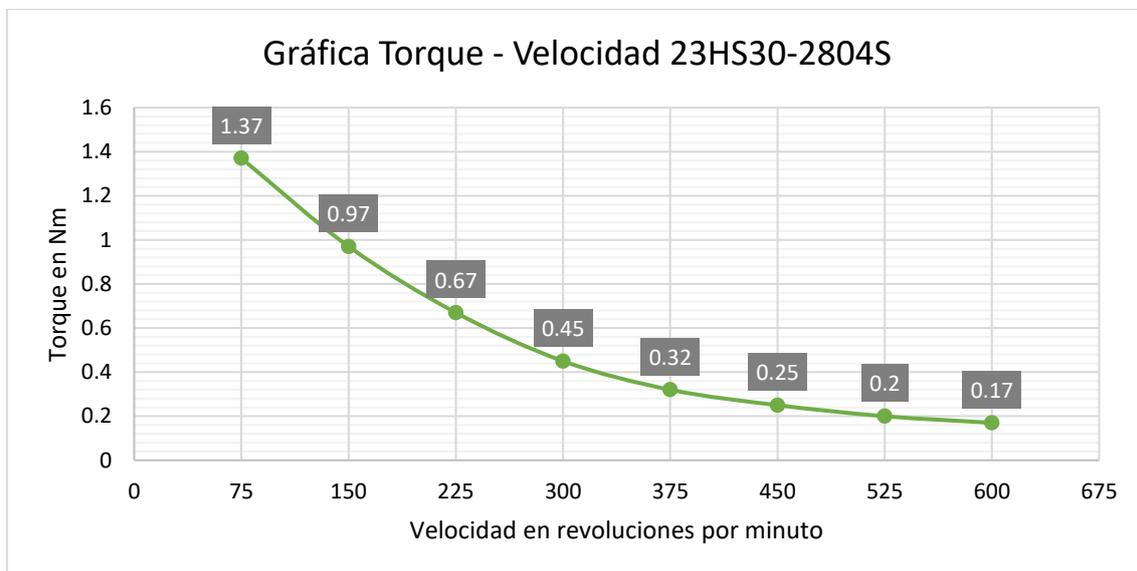
Los motores a paso que se seleccionaron, van de acuerdo con el tipo de trabajos que se van a realizar en el torno, para efecto de cálculos se tomará un motor

23HS30-2804S como el indicado y muy posiblemente seleccionado por su accesible costo y fácil control del mismo.

Los motores que se escogieron, son NEMA 23, cuyas características, mas importantes son las que se indican a continuación:

- Torque de detenimiento 1.9 Nm
- Angulo avanzado por paso: 1.8 grados.
- Corriente consumida: 2.9 amperios

Hay una gráfica de alta importancia, que indica cual es la relación que tiene este motor en referencia y comparación con su velocidad. En la Figura 3.14 se indica la gráfica torque velocidad del motor que se ha seleccionado.



**Figura 3.14.** Gráfica torque - velocidad del motor seleccionado.

**Fuente:** OMC Internacional.

Se conoce que la ecuación que determina la fuerza que puede generar un tornillo de potencia en función del torque que se le aplica, es la que se indica (11).

$$\tau = \frac{F}{2} \left[ \frac{l + \mu \pi dm}{\pi dm - \mu l} \times dm + \mu cdc \right] \quad (11)$$

De esta ecuación, se conoce que:

- U: es el coeficiente de rozamiento, en este caso, sería entre bronce dulce y acero, se tomará 0.18.
- Dm: es el diámetro medio del tornillo, evidentemente esto es función del paso.
- Uc: es el coeficiente de rozamiento del collarín.
- Dc: es el diámetro del collarín.
- L: es el avance.

Lo que se quiere determinar, es cuál es el paso ideal, de forma que, en base a esto, se pueda proceder con la fabricación del tornillo. Es evidente que lo que se persigue es que la fuerza sea máxima, antes que la velocidad, puesto que tendrá un recorrido reducido y no es necesario que se mueva con tanta velocidad.

Para el diámetro menor, el valor mínimo debe ser de 13 milímetros, esto es debido a que las chumaceras de piso que se colocaron son de media pulgada, es decir 12.7 milímetros. En consecuencia, el siguiente acero comercial es de 13 milímetros.

Para una rosca cuadrada o ACME, el diámetro medio se define como:

$$dm = \text{diámetro menor} + \frac{p}{2} \quad (12)$$

Si la base es de 13 milímetros, entonces el diámetro menor es función del paso mediante la expresión que se indica en la ecuación 13.

$$dm = 13 + \frac{p}{2} \quad (13)$$

El tornillo de potencia para este caso, tendrá únicamente una entrada, puesto que al aumentar el número de entradas el costo del tornillo se incrementa bastante, pues su forma de fabricación varía mucho.

En este punto, el avance, también viene a ser función del paso mediante la ecuación 14.

$$l = \# \text{ de entradas} \times \text{paso} = 1 \times p \quad (14)$$

Para este caso, se tomará al diámetro del collarín como si fuera el mismo que el diámetro del tornillo, y al coeficiente de rozamiento se le considerará 0.18.

Reemplazando todo en función del paso, podemos obtener una expresión de fuerza, en función del paso, es decir un  $F(p)$ , observar la ecuación 15.

$$F = \frac{2\tau}{\left[ \frac{p + \pi \times 0.18 \times (13 + p)}{\pi \times (13 + p) - 0.18p} \times (13 + p) + 0.18(13 + p) \right]} \quad (15)$$

Simplificando esta expresión se obtiene la ecuación que se indica a continuación.

$$F = \frac{2\tau \times (2.961p + 40.84)}{2.098p^2 + 41.976p + 191.129} \quad (16)$$

Para una serie de pasos posibles de fabricar, que son los que se indican en la tabla a continuación, se genera una posible serie de fuerzas que están en función del torque. Asumiendo un torque constante de 1 Nm se genera una serie de fuerzas netas. Observar la tabla.

**Tabla 5.** Fuerza generada por un tornillo de potencia cuyo diámetro menor es de 13 milímetros y está en función del paso.

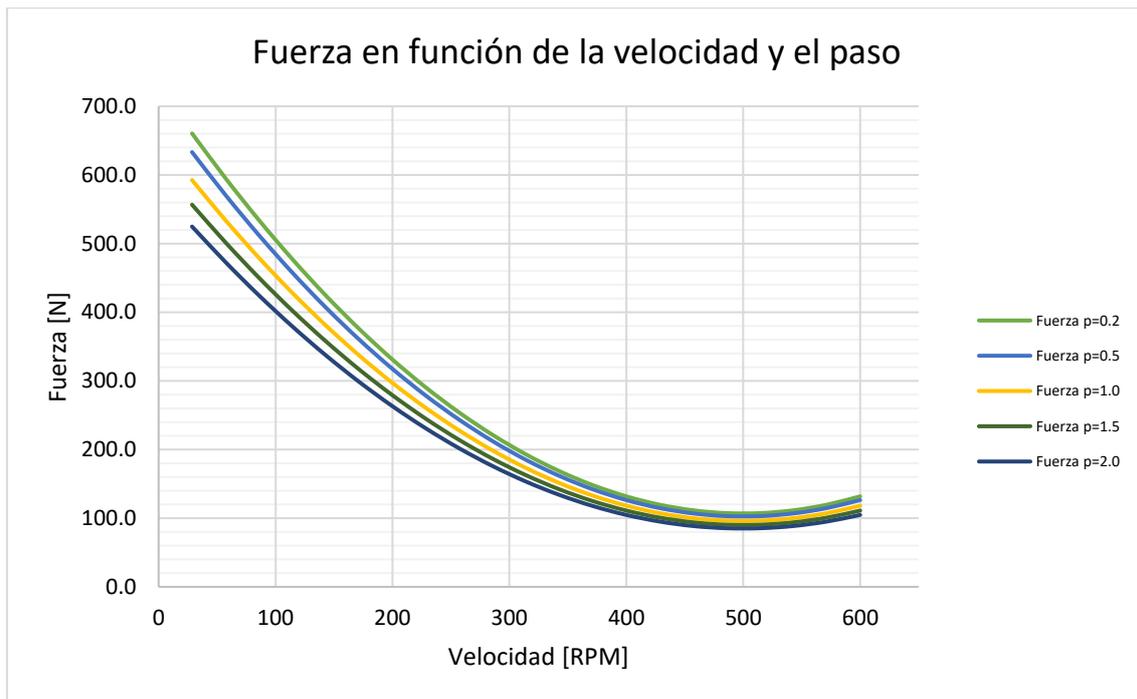
Pasos	Fuerzas $F(p)$
0.2	415.14
0.25	412.19
0.35	406.41
0.5	398.05
0.75	384.83
1	372.45
1.25	360.84
1.5	349.92
1.75	339.63
2	329.92
2.25	320.75

2.5	312.07
2.75	303.84
3	296.02
3.25	288.60
3.5	281.53
3.75	274.80
4	268.38
4.25	262.26
4.5	256.40
4.75	250.79

Ahora, haciendo una pequeña regresión rápida de la curva de la figura 68, mediante el uso de Excel, una curva polinómica de segundo orden, tenemos la siguiente ecuación:

$$\tau[Ncm] = 6 \times 10^{-3}v^2 - 6v + 1757.5 \quad (17)$$

Sustituyendo esta ecuación en la numero 16, podemos obtener una representación de la fuerza que genera el tornillo en función de la velocidad de rotación del motor a pasos. Si, además, se grafica esta ecuación resultante, se puede obtener lo que se indica en la Figura 3.15.



**Figura 3.15.** Gráfica de la fuerza como función de la velocidad y paso.

Nótese que esta gráfica arroja una conclusión súper importante, y es de hecho que si el paso fuera, de 0.2 milímetros por revolución, la máquina tendría una fuerza de 660 N si gira a 28 revoluciones por minuto, eventualmente, a medida que se incrementa el paso, eso se reduce.

Sin embargo, el grave problema que se encuentra aquí, es que fabricar un tornillo de rosca ACME o cuadrada de paso 0.2 y de una longitud de 560 milímetros es realmente una cuestión muy complicada. Por esta razón se averiguó en los mejores centros de mecanizado del país, e incluso en el extranjero, sobre cuál sería el paso mínimo que pudieran alcanzar garantizando que el precio no se dispare por los cielos; la respuesta fue común entre la mayoría, 2 milímetros.

### 3.3. SELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL ELECTRÓNICO

Para los circuitos electrónicos, el primer paso es determinar cuál sería la mejor forma de controlar el motor y que tipo de motor se debería colocar para el husillo. Según 10, lo que se requiere para que la máquina pueda vencer la inercia sin

mayor dificultad y además alcanzar la velocidad máxima de 20 revoluciones son 1343.15W, es decir aproximadamente 2hp.

El lugar donde se ubica la máquina tiene una acometida bifásica de 120VAC, es decir, cuenta con 2 líneas de 120VAC con respecto al neutro y 220VAC entre ellas.

Por temas de costos, la mejor opción es un motor trifásico de 2 hp. En el mercado un motor de 2 hp monofásico bordea los \$210 dólares y tiene un gran tamaño.

Por su parte, un motor trifásico de 2 hp cuesta cerca de \$180, y la gran ventaja que tiene este motor, es que los variadores de frecuencia trifásicos son muy comerciales y no son tan costosos, adicionalmente, la acometida que se requiere para la conexión de un variador trifásico puede ser bifásica o monofásica.

El variador que se escoge para este motor, es el que se indica en la Figura 3.16 y es de 2.2 kW, a pesar de que el motor es de 1.3 kW, este mismo variador puede ser funcional en caso de que se requiera aumentar de tamaño el motor del husillo en un futuro. Ventajosamente, el fabricante indica cual debe ser la configuración que se debe realizar en el variador cuando se controla un motor que tiene una potencia inferior a la nominal del variador de frecuencia, razón por la que, para este tipo de variador, no existe inconveniente alguno al realizar una conexión entre un motor de 2hp y un variador de 3hp.



**Figura 3.16.** Variador de frecuencia Lapond de 2.2 kW.

**Fuente:** tomado de Amazon Imágenes.

En la sección 2.7, se explica el tipo de motores que se utilizan en la máquina, según el fabricante, estos motores tienen un consumo de corriente pico de 2.9

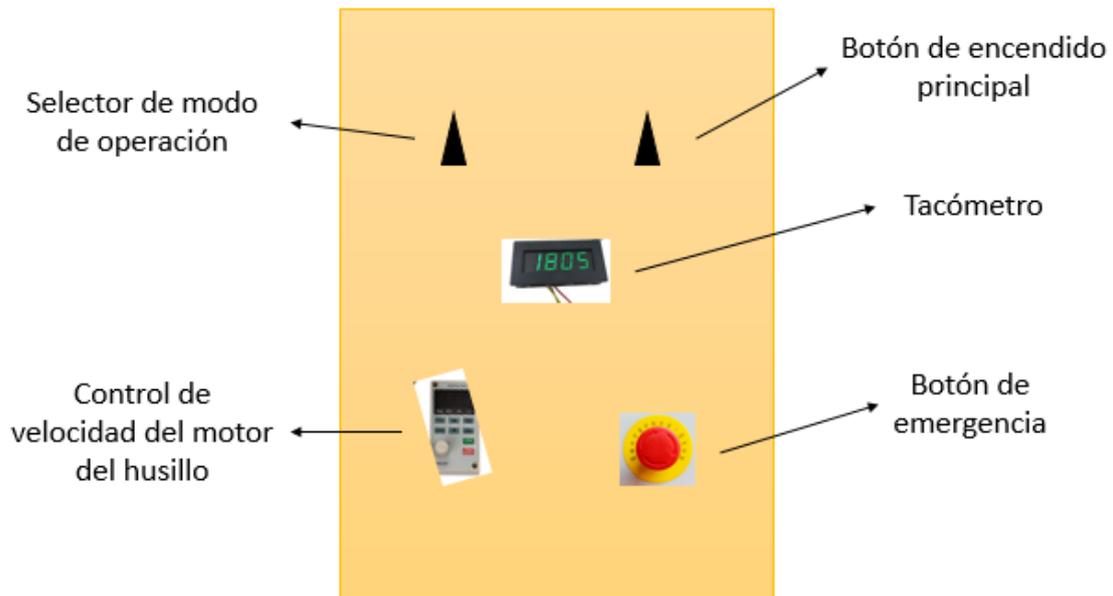
amperios, razón por la que se deben utilizar módulos o drivers que puedan controlar estos motores y soportar la corriente indicada. En el mercado existe gran variedad de controladores, sin embargo, es importante tener en cuenta que, los drivers deben tener una cubierta metálica y deben ser optoaislados para garantizar que tengan una buena respuesta frente a las interferencias electromagnéticas que pudieran generarse. El driver que se escogió es el conocido TB6560, que es el controlador que se indica en la Figura 3.17. Este controlador agrupa todas las características mencionadas anteriormente y tiene un bajo costo.



**Figura 3.17.** Módulo controlador de motores a paso TB6560.

*Fuente: tomado de Amazon Imágenes.*

Para el tablero de control, por un tema económico, se limitó a colocar los componentes que se indican en la Figura 3.18.



**Figura 3.18.** Componentes del tablero de control que deben ser ubicados en la parte frontal.

Con estos componentes se garantiza que se puede tener 3 diferentes tipos de control sobre la máquina, sin embargo, para el modo semi automático, es importante que las tarjetas de control de este modo, se encuentren ubicadas en otro tablero independiente por dos razones.

La primera, es debido a que, si se ubica todo en un solo tablero, el tamaño de éste se vuelve demasiado grande, y, en consecuencia, no hay como colocarlo con facilidad en donde debe ir ya que la altura máxima es de 80 centímetros.

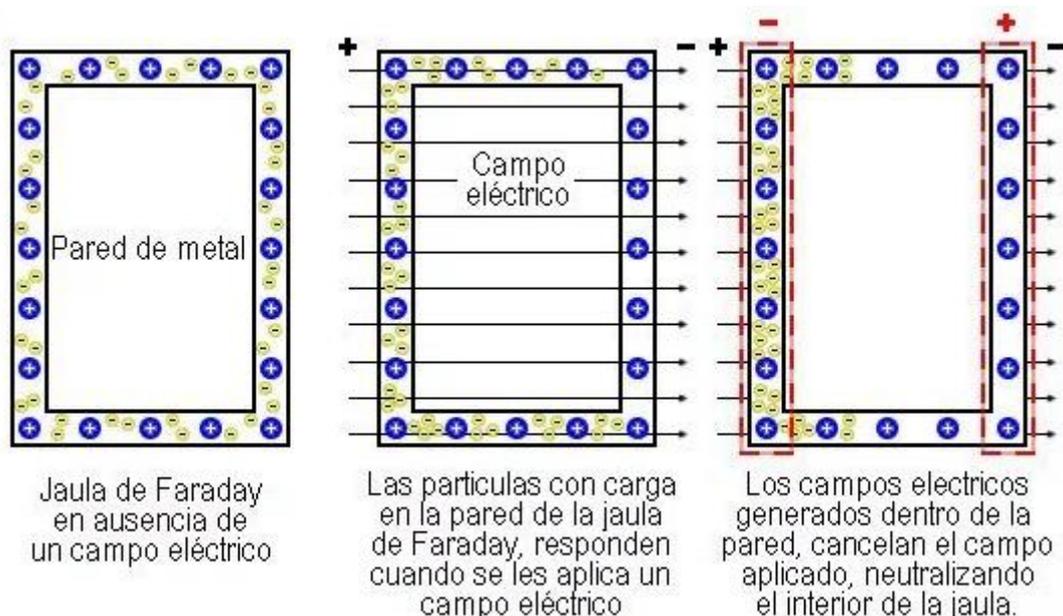
La segunda, y más importante, es por el tema de interferencias. El controlador de la pantalla que se indicó que se va a utilizar es una raspberry pi, esta tarjeta es sensible a interferencias, peor aún si se la coloca al lado del variador de frecuencia, que es un aparato que por lo general tiene fuertes transitorios.

Por esta razón es conveniente colocar dos tableros separados y con puestas a tierra debidamente colocadas.

La colocación de dos tableros aislados surge de la aplicación práctica de una Jaula de Faraday, dentro del tablero de control estaría alojado el variador de frecuencia, un componente eléctrico que funciona en base a un convertor AC-

DC-AC, esto lo realiza en base a una serie de conmutadores electrónicos que durante el proceso de conversión DC-AC generan fuertes transitorios que escapan por los conductores del variador [18], estos transitorios se dispersan desde el variador hacia el ambiente que los rodea, interfiriendo fuertemente con dispositivos electrónicamente sensibles que se encuentren próximos al variador. Al estar el variador encerrado en un gabinete metálico, las ondas electromagnéticas de ruido generadas por los transitorios rebotan en las paredes metálicas del gabinete evitando su salida hacia el ambiente, lo cual es un punto positivo para los demás artefactos electrónicos que se encuentren en la habitación. Sin embargo, si se coloca una tarjeta electrónica altamente sensible al ruido electromagnético dentro del mismo gabinete existe una muy alta probabilidad de un malfuncionamiento de la misma.

Por esta razón, es conveniente colocar las tarjetas sensibles al ruido electromagnético en otro gabinete aislado – que actuaría como una jaula de Faraday – de forma que todas las interferencias externas no puedan ingresar al gabinete o que aquellas que se inducen en las paredes metálicas se descarguen hacia la puesta a tierra. La explicación que existe por detrás del funcionamiento de una Jaula de Faraday se explica en la Figura 3.19.



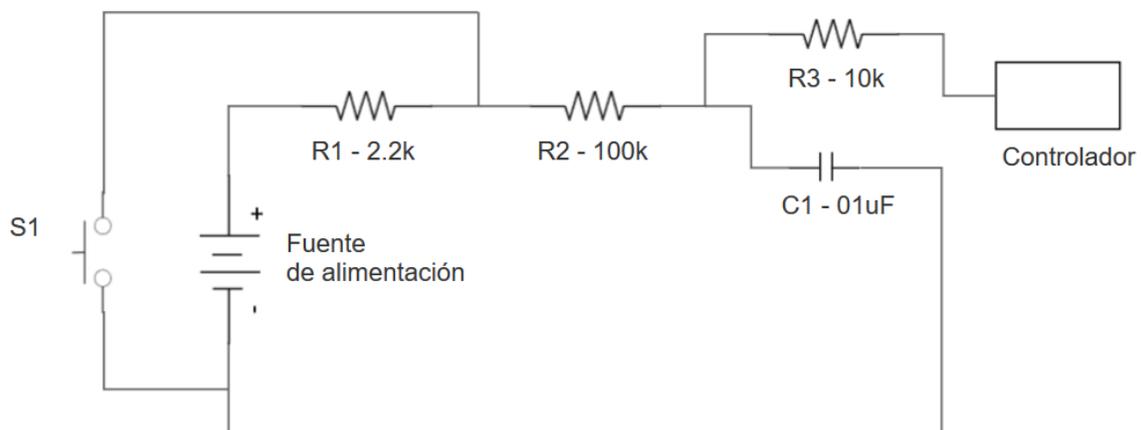
**Figura 3.19.** Funcionamiento de una Jaula de Faraday.

**Fuente:** Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos [18]

Como se mencionó anteriormente, se requiere la elaboración de un mando que pueda separarse del tablero y que permita controlar la máquina desde la posición de trabajo variable de un operario. Para realizar el control del mando, es importante tener en consideración algunos factores, el primero, es que este mando estará ubicado a aproximadamente 1.5 metros del cajetín de control. Esto es un grave problema considerando que la lectura de estos botones la realizan tarjetas de control que manejan voltajes inferiores o iguales a 5 voltios.

En un conductor tan largo, que está inmerso en un ambiente de interferencias el primer fenómeno físico que ocurre es la inducción de corrientes parásitas en el conductor, si estas corrientes no son bien controladas y reducidas pueden ocasionar serios problemas en la máquina, incurriendo en que se accionen automáticamente algunos mandos y puedan ocasionar accidentes.

Por esta razón de se ha diseñado un circuito electrónico que permite controlar esto de una muy buena forma, en la Figura 3.20 se indica un circuito anti rebote con control de interferencias al que se deberá conectar el mando.

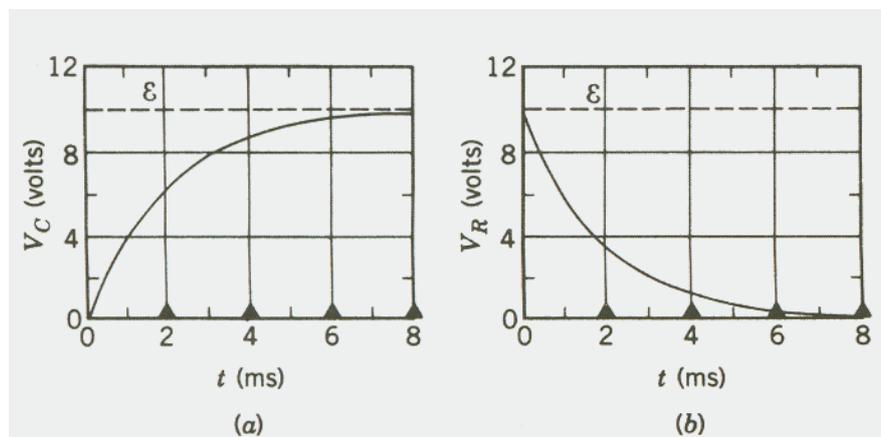


**Figura 3.20.** Circuito de control anti rebote y manejo de interferencias.

El circuito de la Figura 3.20 tiene un funcionamiento bastante peculiar, pues, su labor es mantener la salida del circuito permanentemente en estado alto, dependiendo del potencial de la fuente de alimentación, el circuito tendrá diferente tiempo de respuesta. Funciona mediante la carga y descarga de un capacitor, esto se lo realiza mediante una resistencia, por lo que este es un

clásico circuito RC. Al tratarse de selectores, se tiene la gran ventaja de que se puede considerar un tiempo bastante amplio entre una variación 1-0-1, esto quiere decir que, por ejemplo, si el botón se encuentra en estado 1 (encendido), manualmente se lo coloca en estado 0 (apagado) y nuevamente se regresa a un estado 1, esto se lo realizaría manualmente, por ejemplo al realizar el cambio de dirección de un motor, donde 1 represente el movimiento hacia el lado izquierdo y cero el lado derecho, este cambio entre encendido – apagado – encendido puede tomar varios segundos, y este es un factor que se toma en consideración para el diseño de la red RC. Tomando en cuenta un cambio excesivamente rápido de estado de los botones, que difícilmente pueda ser inferior a 100mS, un tiempo de detección de cambio de estado de voltaje leído por el controlador de 30mS sería más que suficiente para que el sistema funcione correctamente, esto sería 3 veces inferior a la peor condición posible.

Tomando en cuenta que, según [19], las curvas de carga y descarga de un capacitor son las que se indican a continuación:



**Figura 3.21.** Curvas de carga y descarga de un capacitor

**Fuente:** *Amplificadores Operacionales y Circuitos Lineales* [19]

En este punto, como se indicó anteriormente, dentro del tablero de control donde se aloja la raspberry pi, se encuentra la tarjeta de control del modo semi automático, sin embargo, es importante diferenciar que la señal del mando debe entrar a ambas tarjetas, tanto a la raspberry pi, como al Arduino, que es la tarjeta de control del modo semi automático, se decidió utilizar este tipo de conexión ya que ambas tarjetas manejan niveles de voltaje distintos y si se realizara una

conexión en cascada, es decir, del Arduino a la raspberry o viceversa y una de ellas falla, entonces consecuentemente la otra fallaría también, pudiendo ocasionar daños a la máquina.

Se deben entonces realizar dos circuitos RC, uno que se cargue y descargue con 5 voltios para el Arduino, y otro que haga lo mismo, pero con 3.3 voltios que maneja la raspberry pi.

Se tomará el voltaje de 3.3 voltios como la peor condición de diseño del circuito, para la curva de carga, el voltaje máximo alcanzado se tomará como 3.2 voltios, ver ecuación 18:

$$3.2v = 3.3v[1 - e^{-\frac{tcarga}{RC}}] \quad (18)$$

En este caso, tomando una resistencia común de 100k, se puede determinar cuál es el capacitor requerido, despejando, se obtiene:

$$\ln\left(1 - \frac{3.2}{3.3}\right) = -\frac{tcarga}{100k \times C} \quad (19)$$

Donde, para un tiempo de carga de 30 milisegundos aproximadamente, se obtiene un capacitor de:

$$C = \frac{30 \times 10^{-3}}{349650.7561} = 85nF \quad (20)$$

Se ha determinado que sería necesario utilizar un capacitor de 85nF, sin embargo, este no es comercial, razón por la que se utiliza un capacitor de 100nF. Realmente, este circuito se carga a través de dos resistencias en serie, una de 2.2k y una de 100k, lo que sería equivalente a una resistencia de 102.2k, sin embargo, la resistencia de 2.2k, tiene una relación de inferioridad de 10 a 1, razón por la cual no se la toma en consideración para el dimensionamiento de la red RC.

Únicamente para efectos de comprobación se determinará que el tiempo de la descarga de la red, se aproxime a los 30mS que se indicaron, para esto, se parte de la ecuación 21 de descarga de un capacitor.

$$v(t) = v_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (21)$$

Tomando como  $v(t)$  un voltaje próximo a 0 voltios, en este caso, 0.1 voltios y  $V_0$  como la peor condición, que en este caso serían los 5 voltios, ya que tardaría más tiempo en descargarse bajo esta condición. La constante Tau – el producto de la resistencia por el capacitor – tiene un valor de 0.01, por lo que determinando el tiempo de descarga se obtiene:

$$\ln\left(\frac{0.1}{3.3}\right) = -\frac{t_{descarga}}{0.01} \quad (22)$$

Obteniendo como resultado un tiempo de 34.96mS. Con estos parámetros, se protegería correctamente los sistemas de lectura de los botones del mando.

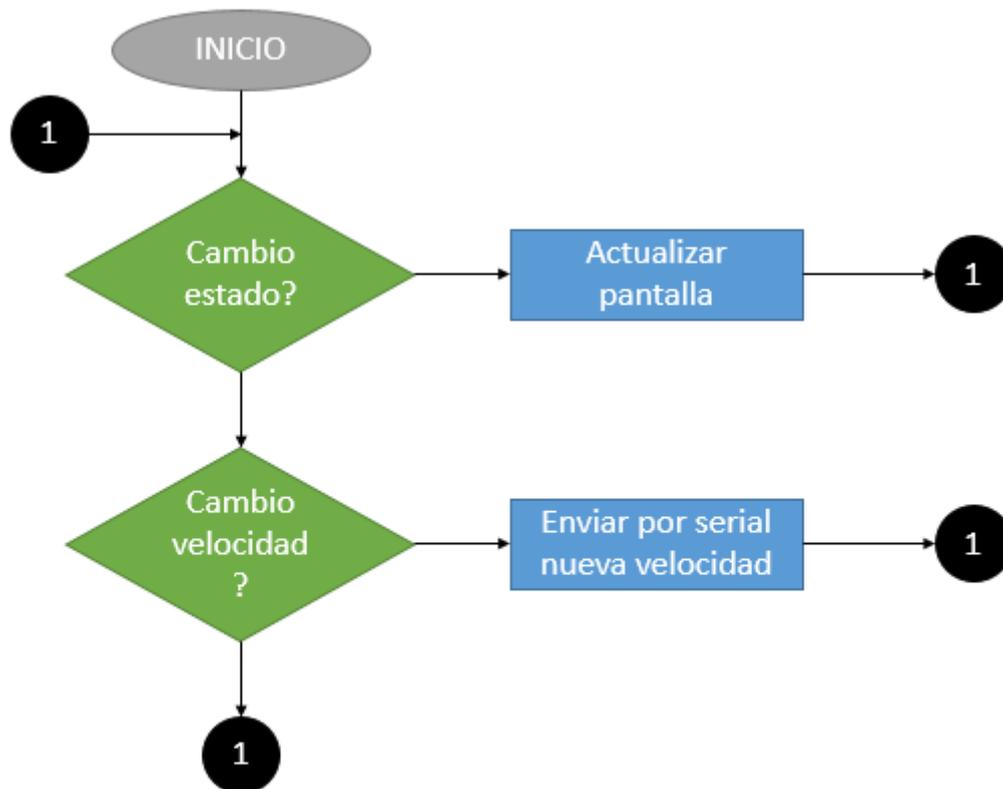
### 3.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ HMI

Como se indicó anteriormente, es importante que, mediante una HMI, se pueda visualizar el estado de algunas variables del sistema, y, adicionalmente, que se pueda ingresar los parámetros de velocidad a los que se busca que la máquina se mueva cuando esté en el modo semi automático.

El HMI estaría únicamente controlado por la tarjeta raspberry pi, esta tarjeta tiene como entrada los pulsadores del mando, un teclado y un ratón, al cambiar de estado uno de los botones del mando, se actualiza la pantalla del HMI.

En caso de que se requiera cambiar la velocidad de avance predeterminada, se realiza el ingreso de la nueva velocidad en mm/min en el cuadro de texto y se envía esta información por serial hacia la tarjeta de control del modo semi automático, es decir, hacia el arduino.

Para esto, se debe seguir la lógica que se muestra en la Figura 3.22.



*Figura 3.22. Diagrama de flujo de la lógica de programación del HMI.*

En lo que respecta a la programación del arduino para el modo semi automático, el diagrama de flujo, es una estructura bastante compleja, sin embargo, sus funciones son las que se detallan a continuación:

- Debe monitorear permanentemente los botones del mando.
- Debe tener 3 botones para cada uno de los ejes:
  - Un botón de HOLD: encargado de enganchar o desenganchar físicamente los motores de las tarjetas de control.
  - Un botón de Dirección: permitirá cambiar de sentido de movimiento.
  - Un botón de arranque
- El botón de HOLD desconecta los motores a pesar de que el botón de ON esté encendido.

- La dirección de los motores no se puede invertir cuando éstos están en movimiento.
- El botón “boost” funcionará únicamente cuando el botón ON esté activado y la máquina esté en movimiento.
- El botón de ON únicamente podrá accionarse cuando el botón de HOLD esté encendido.

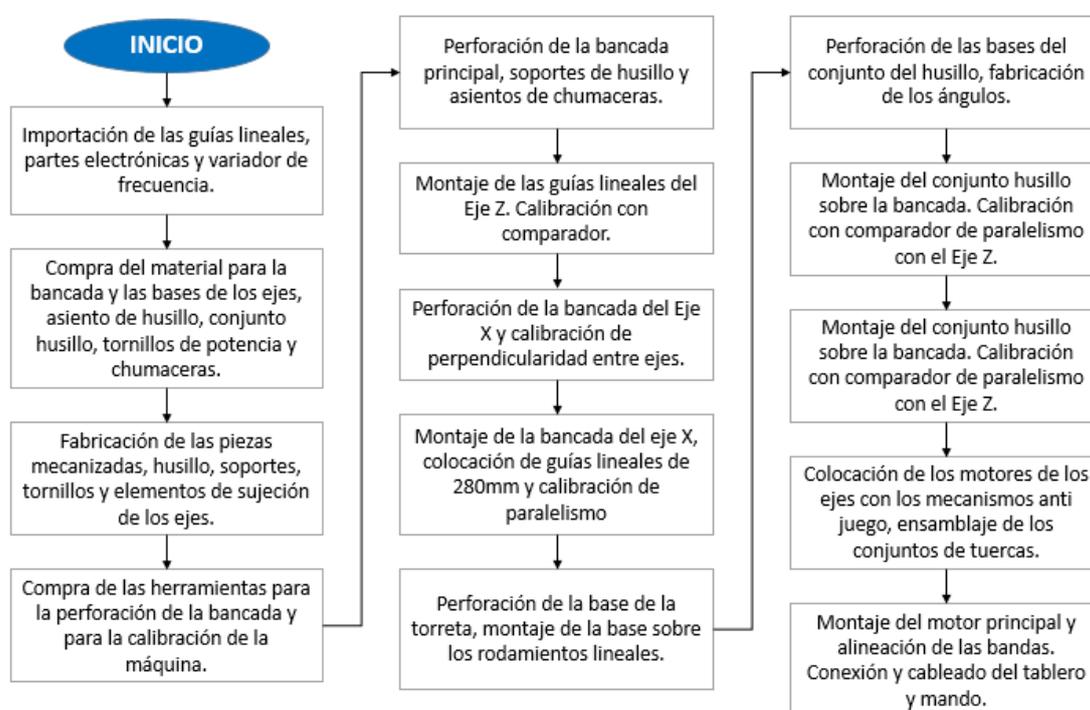
## CAPÍTULO IV

### 4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

#### 4.1. FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINA Y LA ESTRUCTURA EN GENERAL

La fabricación de esta máquina es sin lugar a dudas, una labor sumamente complicada, se deben alinear cuidadosamente todos los elementos de máquina para que estos tengan la menor desviación posible y la máquina alcance la exactitud que se busca.

Para que el proceso constructivo de la máquina pueda ser exitoso, se debe seguir el diagrama de flujo que se indica en la Figura 4.1. Todo comienza desde la importación y adquisición de la materia prima.



**Figura 4.1.** Diagrama de flujo de la manufactura de la máquina.

Comenzando por la bancada, para su fabricación, se requiere cortar en láser las partes, más específicamente, todas aquellas que son consideradas como parte de la bancada. En la Figura 4.2 se observa el proceso de perforación de los agujeros de la bancada.



**Figura 4.2.** Perforación de la bancada para la colocación de las guías lineales.

La perforación de la bancada se la realizó artesanalmente, con un taladro de banco y las mediciones fueron realizadas con un calibrador. En la Imagen 4.2 se observa una de los rieles lineales que se colocaron sobre la máquina.

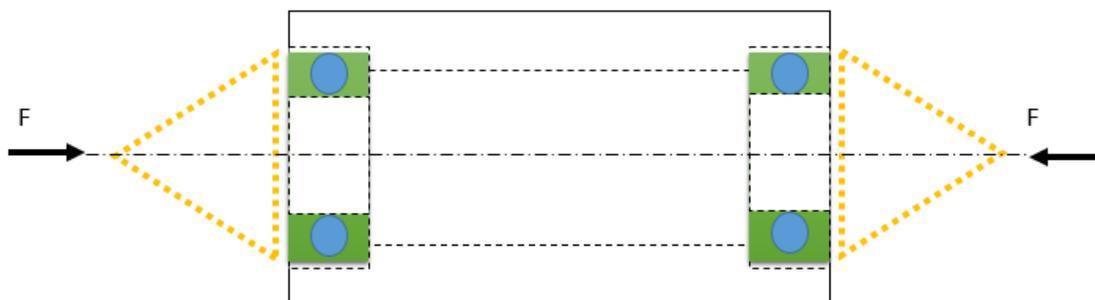
Con la bancada perforada, se procedió a colocar las chumaceras y a realizar la alineación de los tornillos. Esto se puede observar en la Figura 4.3.



*Figura 4.3. Montaje de las guías lineales y alineación de las chumaceras.*

Para la fabricación del conjunto del husillo, se debió seguir un riguroso proceso de mecanizado, considerando que se trata de una máquina herramienta que busca tener la mayor exactitud posible, es importante que durante los procesos de mecanizado se alcancen las tolerancias más ajustadas posibles.

El conjunto del husillo está conformado por dos rodamientos de bolas de contacto angular, y estos van montados de forma que componen un contraguiado axial, esta estructura es la que se observa en la Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Contraguiado axial conseguido por la colocación de dos rodamientos de contacto angular de bolas colocados opuestos.

Este es un mecanismo muy robusto, siempre y cuando sea correctamente ensamblado y fabricado, y por consecuencia debe ser cuidadosamente alineado.

Para su fabricación, se requirió colocar un bloque de acero en el mandril de un torno previamente verificado, se mecanizó el primer alojamiento del rodamiento, y después, en la misma posición, se mecanizó el segundo alojamiento del rodamiento. Esto fue verdaderamente un reto de realizar, puesto que el segundo lado se mecanizó prácticamente “a ciegas”, sin embargo, se logró conseguir la mejor precisión posible. En la Figura 4.4 se observa el proceso de mecanizado del conjunto husillo.



*Figura 4.5. Fabricación del conjunto del husillo.*

De la misma forma, en la Figura 4.5, se observa la fabricación del husillo como tal.



*Figura 4.6. Fabricación del husillo.*

La soldadura que se utilizó, es una especial precisamente para soldar acero inoxidable. El acero del conjunto del Husillo, es uno de los de mejor calidad que se encuentran. Es un acero AISI 4340, tiene propiedades mecánicas excelentes, una dureza bastante alta por lo que el mecanizado de este acero es un poco complicado.

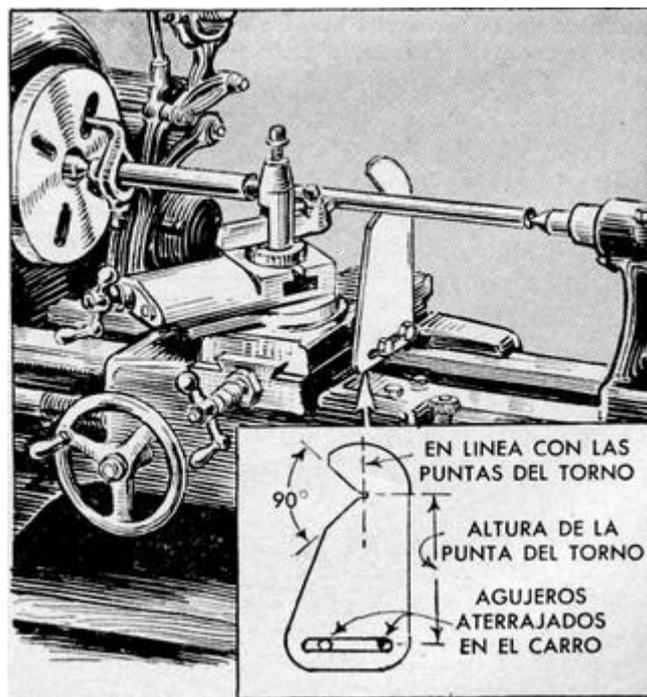
En la Figura 4.6, se observan los tornillos de potencia fabricados.



*Figura 4.7. Tornillos de potencia de paso 2 mm fabricados.*

Sin lugar a dudas, la fabricación de los tornillos de potencia fue la parte más compleja de todo el proceso de mecanizado, puesto que por su reducido diámetro exterior (16 milímetros) al momento de mecanizar los valles de los tornillos, éstos se flexionaban y se deformaban.

Para mitigar esto, se debió utilizar una técnica conocida como luneta móvil, lo que implica colocar una luneta anclada al eje transversal del torno, esta técnica se observa en la Figura 4.7.



*Figura 4.8. Técnica de la luneta móvil, con la que se debió fabricar los tornillos de potencia del torno.*

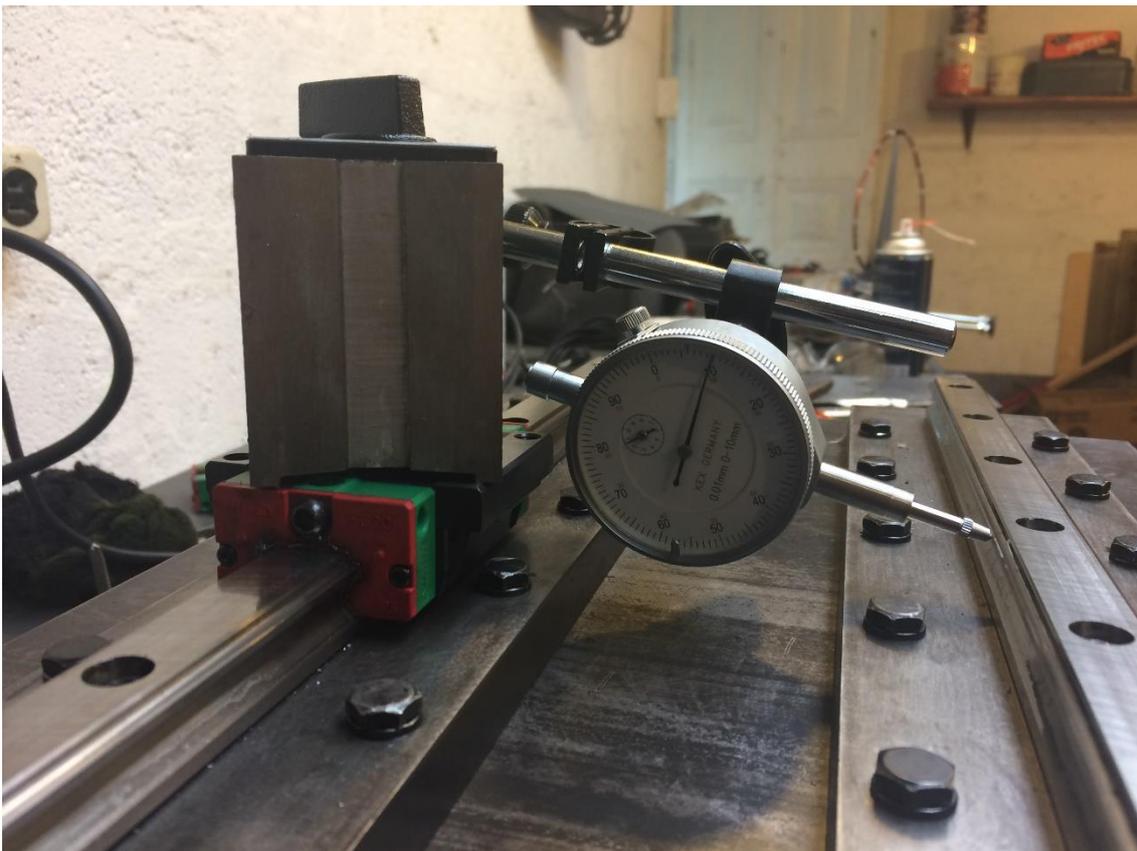
Para la fabricación de la H, que es la estructura en la que se sujetan las tuercas de los tornillos de potencia, se requirió realizar un fresado de dos bloques de material, logrando obtener un resultado satisfactorio, esto se observa en la Figura 4.8.



*Figura 4.9. Estructura en la que van acopladas las tuercas de los tornillos de potencia.*

#### 4.2. ENSAMBLAJE DE LAS PARTES MECÁNICAS Y CALIBRACIÓN DE LOS ELEMENTOS

Finalmente, con todo esto fabricado, se procedió a realizar la calibración de los componentes de máquina. En este paso, se encontraron muchos problemas. En la Figura 4.9, se indica cómo se realizó la calibración de las guías lineales, haciendo uso de un reloj comparador.



*Figura 4.10. Calibración de paralelismo entre las guías lineales del Eje Z.*

Para garantizar que éstas guías operen correctamente y tengan una prolongada vida útil, según el fabricante, se requiere que al menos se cumpla una tolerancia de paralelismo de 0.05 milímetros.

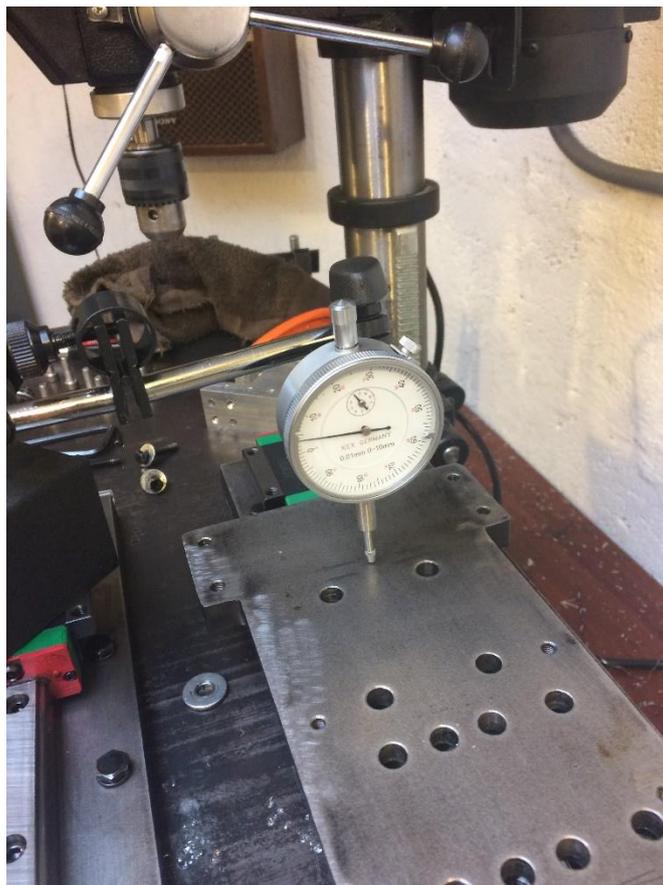
Cuando se comenzó a ensamblar el conjunto, se logró alcanzar dicha tolerancia de paralelismo, sin embargo, la tolerancia de paralelismo medida de forma vertical fue un total fracaso. En la Figura 4.10, se indica cómo se debieron realizar las mediciones para encontrar la causa raíz del problema.

Y en realidad, se trató de un problema durante la fabricación de la base del eje X. Las piezas que se utilizaron en la base, son cortadas en plasma, durante este proceso, el metal alcanza altísimas temperaturas y, por error, durante su fabricación, se enfrió repentinamente el material.

Esto ocasionó una serie de problemas, comenzando por la deformación permanente de las bases, y, además, en aquellas que no sufrieron una deformación significativa, su estructura interna se alteró, logrando lo que se conoce como “acero templado”.

El acero templado tiene propiedades mecánicas muy diferentes al acero dúctil, pues su dureza es mucho mayor, y, en consecuencia, su mecanizado es más complejo.

Por esta razón, cuando se intentaban realizar perforaciones cercanas a los bordes de la bancada de la máquina, cuyo enfriamiento fue más dramático que en el centro de la base, las brocas quedaban sin filo o se rompían, de la misma forma ocurrió con los machuelos.



*Figura 4.11. Medición de deformación de la base del Eje X.*

#### **4.3. ACOPLAMIENTO DE MOTORES Y ELEMENTOS ELECTROMECÁNICOS**

La fabricación y montaje del mecanismo anti juego de las tuercas, se realizó de acuerdo como se muestra en la Figura 4.11. Se pudieron acoplar satisfactoriamente las tuercas con los resortes, el mecanismo funcionó perfectamente.

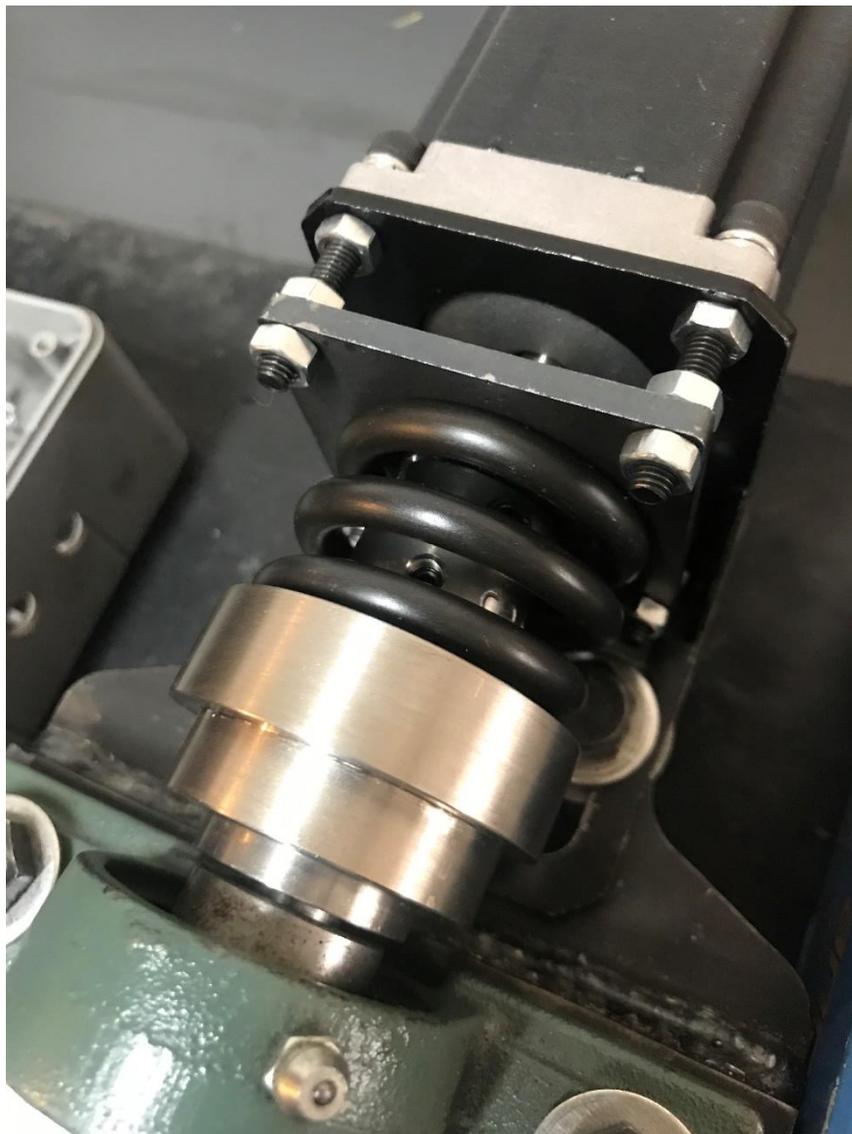


*Figura 4.12. Mecanismo anti juego para los tornillos de potencia.*

De la misma manera, para los mecanismos de eliminación de juego de los apoyos de los tornillos de potencia, a pesar de que el ensamblaje fue complejo como se pronosticó, de igual forma funcionaron excelentemente bien.

Éstas piezas fueron fabricadas en acero inoxidable, y, como se mencionó anteriormente, se las diseñó cautelosamente de forma que no ingresen virutas a los rodamientos axiales de bolas.

En la Figura 4.12 se puede observar el mecanismo anti juego de los soportes de los tornillos ya ensamblado.



*Figura 4.13. Ensamblaje de los mecanismos anti juego de los tornillos.*

Finalmente, para el ensamblaje del motor, se colocaron dos bisagras en la bancada, de forma que éstas permitan regular la tensión de la banda.

Con el motor colocado, se procedió a colocar las bandas y templarlas hasta garantizar que las mismas no patinen y que tampoco estén muy templadas.

En la Figura 4.13 se indica el motor colocado con el respectivo conjunto de poleas alineado con el conjunto del husillo.



*Figura 4.14. Colocación del motor principal del husillo y alineación del mismo con el conjunto.*

#### **4.4. INSTALACIÓN Y ACOPLAMIENTO DE LA ELECTRÓNICA Y CONTROL**

Para el tablero de control y su ensamblaje, se decidió utilizar un gabinete metálico comercial, de forma que se puedan colocar cómodamente todos los elementos de control y potencia sin mayor complicación.

Para realizar las conexiones eléctricas se utilizó un alambre multifilar AWG 18 para todas las conexiones que no son de potencia. Para la conexión del motor principal, del contactor de activación del motor principal se utilizó un alambre grueso AWG 10.

En la Figura 4.14, se puede observar la conexión que se realizó en el tablero de control.



**Figura 4.15.** Conexión y cableado del tablero de control del torno CNC.

Como se puede observar en la Figura 4.14, hay algunos elementos de control que no se han mencionado. El contactor cumple la función de controlar el encendido del variador de frecuencia.

#### **4.5. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL**

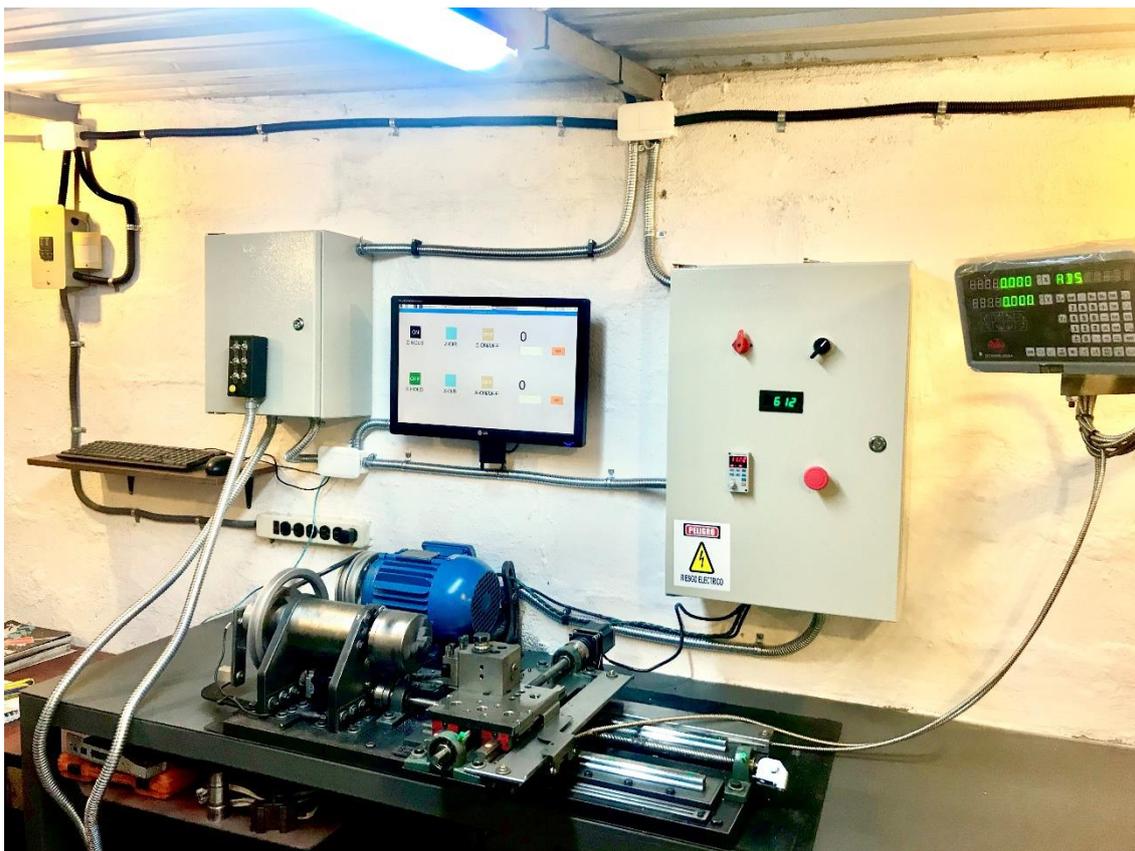
Para el tablero de control pequeño, se fabricó el mando de control y se colocaron las tarjetas del HMI. Esto se puede observar en la Figura 4.15.



**Figura 4.16.** Conexión y cableado del tablero de control del HMI.

Finalmente, toda la máquina ensamblada y funcional se puede observar en la Figura 4.16, satisfactoriamente la máquina cumplió todas las expectativas en cuanto a su funcionamiento.

Los mandos funcionaron de acuerdo con lo planificado, los modos de control son configurables y la máquina tiene gran rigidez.



*Figura 4.17. Torno CNC finalizado y funcional.*

#### **4.6. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA**

Para realizar la elaboración del protocolo de pruebas, se debe seguir una serie de pasos que permitan determinar si los diferentes parámetros clave de la máquina operan de acuerdo a lo que se ha requerido.

En una primera instancia, y comenzando por una de las partes más importantes, es determinar que la máquina funcione dentro del rango de velocidades que se requieren para poder realizar las diferentes operaciones de mecanizado.

Para esto se deben seguir los diferentes pasos, de acuerdo con el libro “Diseño Concurrente” [4].

##### **a) DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL ENSAYO**

1. Conocer si el funcionamiento de los elementos de máquina va de acuerdo con lo pronosticado.

2. Determinar si se cumplen los parámetros de avance, velocidad, diámetros de mecanizado y longitud de desplazamiento de los ejes.
3. Realizar las pruebas en el mecanizado para determinar características de las piezas elaboradas, exactitud, precisión y acabado superficial.

Con estos objetivos bien planteados, se puede proceder a realizar el diseño del ensayo. Para esto, se deben prever condiciones de funcionamiento simuladas y ensayos que se realicen rápidamente.

#### **b) DISEÑO DEL ENSAYO**

En el ensayo se deben medir los parámetros que se indican a continuación.

- Encendido correcto de la máquina.
- Trabajo prolongado y continuo durante horas.
- Trabajo al vacío, sin carga
- Verificación de cumplimiento de rango de velocidades de los motores
- Juego mecánico en los ejes
- Velocidades máximas de avances, en vacío y durante el mecanizado
- Diámetros máximos y mínimos de mecanizado
- Desplazamiento correcto de los ejes
- Exactitud durante el mecanizado
- Precisión del mecanizado
- Acabado superficial del mecanizado

Para este punto, resulta conveniente separar el ensayo en dos partes, la primera, referente a las características básicas de la máquina y la segunda parte referente a su capacidad para cumplir los objetivos.

### c) PLANIFICACIÓN DEL ENSAYO

Para poder realizar el ensayo que se indicó anteriormente se elaboró la hoja de ensayos que se indica en la Figura 4.18.

Protocolo de ensayos para un torno CNC			
Fecha del ensayo: _____			
Ensayo realizado por: _____			
Tipo de ensayo	Correcto	Incorrecto	Observaciones
Encendido de la máquina			
Trabajo prolongado por horas			
Trabajo al vacío sin carga			
Rango de velocidades alcanzadas por el husillo			
Juego mecánico en los ejes			
Velocidad máxima mm/min de los ejes			
Diámetros máximos de mecanizado			
Desplazamiento completo de los ejes			
Tiempo del ensayo: _____			

*Figura 4.18. Protocolo de ensayos a realizar para un torno CNC.*

### d) PREPARACIÓN DEL PROTOTIPO Y DEL BANCO DEL ENSAYO

Por supuesto que antes de arrancar con el mecanizado, se debe iniciar con el protocolo de pruebas que se indica en la Figura 4.19, y para esto, se requiere seguir los siguientes pasos:

- Primero asegurarse que toda el área donde se va a trabajar esté despejada, sin herramientas ni elementos que puedan atorarse en la máquina.
- Ajustar las mordazas del mandril sin ningún material para asegurarse que no salga disparado.
- Colocación de los EPP para poder proceder a encender la máquina.
- Se procede a encender la máquina.

- Colocar el variador de frecuencia en 5 Hz.
- Iniciar el variador y verificar que gire con suavidad.
- Colocar la máquina en el modo semi automático y encender los ejes a una velocidad de 10 mm/min que está configurada por defecto.
- Si todo está bien, se procede con la elaboración del protocolo.

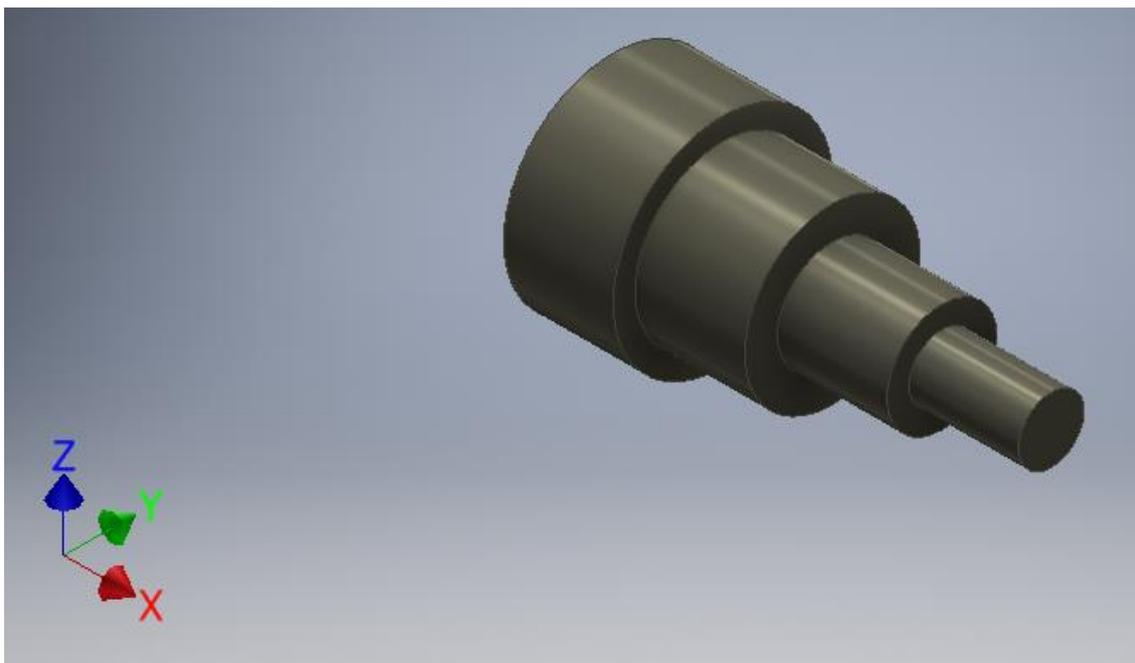
Una vez se han validado todos estos pasos, se llena el protocolo de pruebas con los resultados que se indican a continuación en la Figura 4.19.

Protocolo de ensayos para un torno CNC			
Fecha del ensayo: <u>28 - ene - 2019</u>			
Ensayo realizado por: <u>Kurt Groner</u>			
Tipo de ensayo	Correcto	Incorrecto	Observaciones
Encendido de la máquina	X		Ventiladores un poco ruidosos
Trabajo prolongado por horas	X		Temperatura de los motores inferior a 35 grados
Trabajo al vacío sin carga	X		Vibra entre 17 - 18.5 Hz y entre 26 - 29 Hz
Rango de velocidades alcanzadas por el husillo	X		300 RPM hasta 3300 RPM, menos de 300 tiene poco torque
Juego mecánico en los ejes	X		Juego presente en ambos ejes, 0.3 mm constante
Velocidad máxima mm/min de los ejes	X		450 mm/min en ambos ejes
Diámetros máximos de mecanizado	X		110 mm de volteo máximo. 2 mm volteo mínimo
Desplazamiento completo de los ejes	X		201 mm Eje X, 320 mm Eje Z
Tiempo del ensayo: <u>3 horas y media</u>			

**Figura 4.19.** Primer protocolo de ensayos realizado.

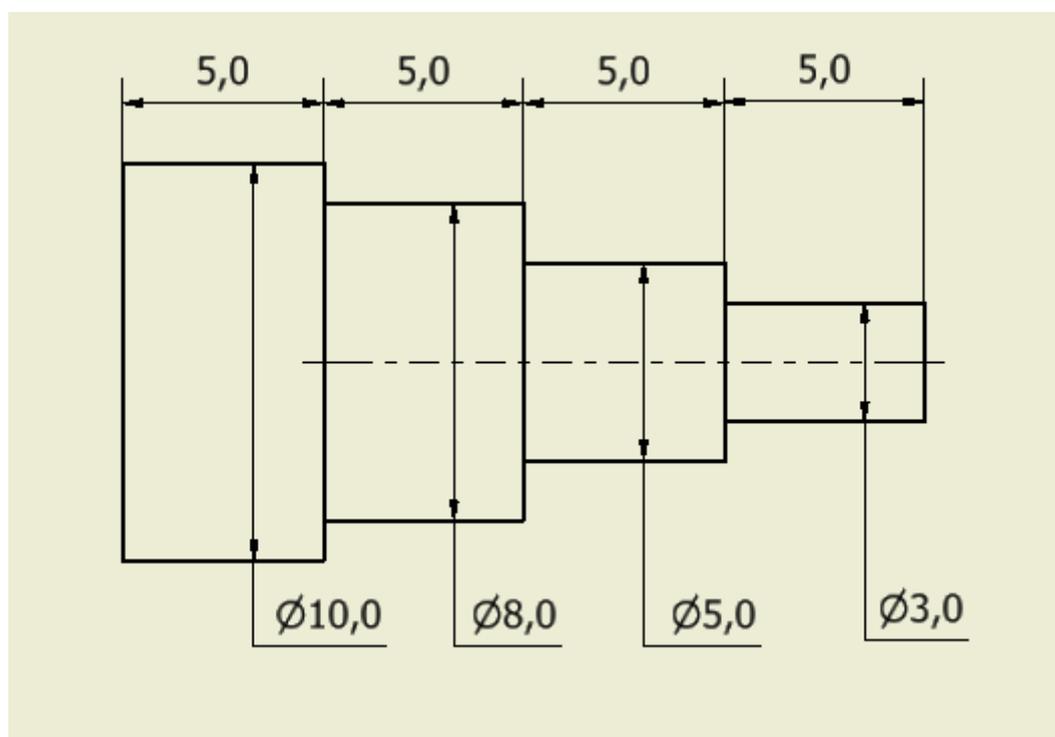
Como se observa, los ensayos que se realizaron fueron muy satisfactorios. Ahora se debe proceder a verificar la calidad de la máquina durante un proceso de mecanizado.

Para poder realizar este ensayo, se realizarán una serie de probetas que deben ser mecanizadas en el torno. Las probetas son las que se indican en la Figura 4.20.



*Figura 4.20. Primera probeta de pruebas a realizar en el torno.*

Las dimensiones de esta probeta son las que se indican a continuación en la Figura 4.21.



*Figura 4.21. Dimensiones generales de la pieza a realizar.*

Este ensayo, se lo realizará en un acero plata rectificado SAEJ1397 que tiene las propiedades mecánicas que se indican en la Figura 4.22.

Tracción	730 - 770 MPa
Fluencia	580 - 610 Mpa
Elongación	17 - 19%
Dureza en estado de recocido	180 - 285 Brinell (HB)
Dureza obtenido en tratamiento de temple	Hasta 65 HRC

**Figura 4.22.** Propiedades mecánicas del acero plata con el que se realizará la primera prueba.

Durante esta prueba se obtuvieron los siguientes resultados, visibles en la tabla:

**Tabla 6.** Resultados de la primera prueba realizada con 6 probetas.

Prueba No	Diámetros			
	3 mm	5 mm	8 mm	10 mm
1	3.002	4.923	7.949	9.95
2	3.043	4.997	7.992	9.994
3	3.02	4.996	7.965	9.989
4	2.997	4.976	7.948	9.98
5	2.99	4.997	7.904	9.911
6	2.936	4.949	7.989	9.995

Como se observa, en todo el proceso, la máxima desviación que se tiene es de 77 micras. En cuanto al acabado superficial, que es común para las 6 pruebas realizadas, se puede afirmar lo siguiente:

- Diámetro de 3mm: acabado superficial regular.
- Diámetro de 5mm: acabado superficial regular bueno.
- Diámetro de 8mm: acabado superficial muy bueno.
- Diámetro de 10mm: acabado superficial muy bueno.

Con estos resultados satisfactorios, se puede afirmar que la máquina cumple con los objetivos propuestos e incluso supera todas las expectativas.

El único punto que genera un poco de disgusto, es el acabado superficial, sin embargo, este es un factor que depende de la cuchilla que se esté utilizando. Para el caso del ensayo que se indicó anteriormente, se utilizó un buril de acero rápido de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de lado.

El afilado de este tipo de herramientas es un proceso complejo, en el que se ven involucrados gran cantidad de ángulos y diversos factores, por esta razón, se decidió realizar una pequeña prueba de acabado superficial con un inserto de carburo de tungsteno sobre un acero bonificado AISI 4340.

Los resultados de este ensayo fueron excelentes, el acabado superficial del material es prácticamente tipo espejo, esto se puede observar en la Figura 4.23.



*Figura 4.23. Acabado superficial del segundo ensayo realizado sobre un acero bonificado AISI 4340.*

Las probetas que se realizaron en el primer ensayo son las que se muestran en la Figura 5.7.



**Figura 4.24.** Probetas del primer ensayo realizadas en un acero plata.

Con la máquina en estas condiciones se han realizado gran cantidad de piezas, permitiendo demostrar una gran versatilidad en cuanto a las dimensiones finales, las mismas que son muy exactas. La máquina funciona con gran rapidez y el acabado superficial es excelente.

En la Figura 5.8 se indica una pequeña pieza que se realizó en el torno en el modo CNC, tiene diferentes diámetros, dos perforaciones a cada lado y un arco. Las perforaciones fueron realizadas con un utillaje.



*Figura 4.25. Pieza de prueba referencial mecanizada con el modo CNC en un acero bonificado AISI 4340 y un inserto de carburo de tungsteno.*

El inserto que se utilizó para la fabricación de esta pieza, es un inserto rómbico de 4 milímetros de espesor, con radio de punta de 0.4 milímetros y de carburo de tungsteno clase K.

## **CONCLUSIONES**

De este proyecto hay conclusiones bastante interesantes. Primeramente, se debe indicar que el proyecto cumple satisfactoriamente los objetivos que se han propuesto. El objetivo general del proyecto, era lograr fabricar un torno CNC con 60 mm de volteo, 300 mm de recorrido en Z y una precisión de 200 micras.

Satisfactoriamente, se logró construir un torno que tiene 110 mm de volteo, 320 mm de recorrido en el eje Z y una precisión de 77 micras 61.5% menos de lo que se propuso.

Los materiales que debía ser capaz de mecanizar eran aceros con una dureza de hasta 130 HB, sin embargo, el torno tiene una capacidad mucho mas alta. Como se indicó, la máquina puede mecanizar sin ningún problema en aceros bonificados como el AISI 4340, cuya dureza es de 34 HRc, es decir, mucho mayor que la dureza de un acero AISI 1018 cuya dureza ni siquiera entra en la escala HRc.

Se realizó un correcto análisis y selección de los materiales y elementos de máquina, trabajando muy de la mano con el tema de presupuestos, ya que la elaboración de una máquina de las características que aquí se ha indicado tiene un coste bastante elevado.

El diseño de la máquina, permite que ésta pueda trabajar sobre cualquier material que pueda ser alojado en el mandril y cuyo diámetro de revolución sea inferior a los 110 milímetros.

Inicialmente, el objetivo propuesto fue controlar la máquina con dos modos de operación, uno manual y uno automático. Se excedieron las expectativas incluyendo un modo adicional de operación semi automático, lo que implicó la colocación de un HMI adicional – aparte del HMI del modo CNC – y también la fabricación de un mando que permita controlar la máquina de forma semi automática.

## **RECOMENDACIONES**

Este es un proyecto muy retador, la fabricación de esta máquina ha tomado mucho tiempo, desde su diseño, su implementación, pruebas, correcciones y demás. Sin embargo, los resultados son satisfactorios.

Como buena práctica, al realizar los cortes de los aceros en plasma, es conveniente verificar que la plancha que se vaya a utilizar sea lo más plana posible, para esto, es recomendable hacer uso de un nivel que tenga los filos rectificadas.

Durante la construcción de la máquina, es recomendable perforar los aceros que sean cortados en plasma con brocas de cobalto, esto se debe a que, durante el corte, el metal alcanza temperaturas muy altas, y se enfría repentinamente debido a la cama de agua que tiene la máquina de corte. Esto tiembla el acero en los extremos, haciendo que sea complicado perforarlo.

Para las bases del eje X y Z, si no se logra cumplir con las tolerancias de planitud requeridas, es indispensable que se realice un rectificado de las caras, este proceso se lo debe realizar en una máquina rectificadora con mesa imantada.

Para la calibración de las guías lineales, es recomendable utilizar un reloj comparador, que permita validar que las guías estén perfectamente paralelas y que estén colocadas al mismo nivel.

En cuanto a los motores, es conveniente utilizar juntas que no sean las elásticas de aluminio que son ampliamente utilizadas para las CNC. La principal razón de esto, es que ese tipo de juntas no soportan un des alineamiento axial, sino únicamente des alineamientos angulares. Durante la fabricación de torno, se encontraron múltiples problemas que no permitieron alinear a la perfección los motores con los tornillos.

Esto fue un fuerte dolor de cabeza, pues imposibilitó el uso de cualquier acople flexible que no soporte des alineamiento axial. Se utilizaron juntas especiales que toleran este tipo de des alineamiento y pueden funcionar en conjunto con un des alineamiento angular.

Finalmente, es recomendable mantener la máquina siempre lubricada apropiadamente, utilizando grasa para los tornillos de potencia y los rodamientos y aceite de maquinaria para los demás mecanismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. D. M. Krahmer, Procesos de arranque de viruta y no convencionales que se aplican en la industria metalmecánica., Lima: INTI - Mecánica, Noviembre de 2008.
- [2] Anónimo, "Sandvik Coroman Sitio Oficial," 2017. [Online]. Available: [https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/formulas](https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas).
- [3] J. Garavito, "Escuela Colombiana de Ingeniería," in *Torno Protocolo Curso Procesos de Manufactura*, Bogotá, FII Producciones, 2007, p. 29.
- [4] P. Carlos, G. Andrade y M. Mejía Vinocuna, «El impacto del proceso de integración regional andino en el desarrollo de la economía ecuatoriana,» Quito - Ecuador, FLACSO, Enero del 2010, pp. Pag. 27-29; Pag. 47;.
- [5] A. Sanchez y N. JAVIER OSCAR ABAD BLASCO, practicas de diseño y construccion de maquinas, Zaragoza: PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA, 2000.
- [6] C. Riva i Romeva, «Diseño Concurrente,» Profesor del departamento de Ingeniería Mecánica, Enero del 2002, p. Pag. 13.
- [7] N. J. O. Díaz, «Análisis de mercado del sector industrias manufactureras en base a CIU 3 bajo un enfoque de concentración económica,» vol. Volumen 2, p. 149, Mayo 2011.
- [8] Dr. R. Benalcázar, «Es necesario volver a dar énfasis a la industrialización en el Ecuador,» *Banco Central del Ecuador*, vol. Volumen 1, p. 14, 2012.
- [9] Dr. F. Santamaría, «La Industria en el Ecuador,» *Ekos Negocios*, vol. Volumen 16, p. 23, Septiembre 2015.

- [10] Ing. D. Martínez Krahmer, *Procesos de arranque de viruta y no convencionales que se aplican en la industria metalmecánica.*, Lima: INTI - Mecánica, Noviembre de 2008.
- [11] Anónimo, "Sandvik Coroman Sitio Oficial," 2017. [Online]. Disponible en: [https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/formulas](https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas).
- [12] V. Quezada, «HMI como monitor de sistemas industriales,» de *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Ciudad de México, FI-UNAM, 2014, pp. Pag 44 - Pag 48.
- [13] J. Garavito, "Escuela Colombiana de Ingeniería," in *Torno Protocolo Curso Procesos de Manufactura*, Bogotá, FII Producciones, 2007, p. 29.
- [14] F. Mateos, «Ingeniería de sistemas y automática,» Universidad de Oviedo, Noviembre 2001. [En línea]. Available: <http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/plc.pdf>. [Último acceso: 2 Octubre 2017].
- [15] P. Baena y G. María Eugenia, «Metodología de la Investigación,» de *Metodología de la Investigación*, Grupo Editorial Patria, Enero de 2014, pp. Pag. 49 - Pag. 51.
- [16] E. Peñafiel, «De Maquinas y Herramientas,» 26 Enero 2011. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/tag/torno-cnc-de-bancada-plana>.
- [17] Anónimo, "Catálogo de rodamientos FAG," en *Catálogo WL 41 520/3 SB*, FAG, 2000, pp. 8-10.
- [18] J. Balcells, «Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos,» Marcombo, 1992, pp. 92-167.
- [19] R. Coughlin, «Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales,» Tokio-Japon, Prentice Hall, 1993, pp. 29-61.

