



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

“Mini Fresadora CNC de Tres Ejes”

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presenta:

**Mariel Arisbet Morales Dávila**

Asesores:

M. en C. Leonardo Fonseca Ruíz

M. en C. Fernando Vallejo Aguirre



Agosto 2012

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS



## Trabajo Terminal II

“Mini Fresadora CNC de Tres Ejes”

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presenta:

---

Mariel Arisbet Morales Dávila

Asesores:

---

M. en C. Leonardo Fonseca Ruíz

---

M. en C. Fernando Vallejo Aguirre

Presidente del Jurado

Profesor titular



---

Ing. Erick López Alarcón

---

Dr. Leonel Germán Corona Ramírez

# DEDICATORIA

## **A mi mamá:**

Por enseñarme a ser la persona que soy y a quién le admiro su fortaleza de carácter a pesar de todos los problemas a los que se ha enfrentado en su vida, saliendo siempre triunfadora.

Por tus consejos, motivación constante, confianza, paciencia, tiempo y por todo el amor que siempre me has brindado.

¡Gracias, te quiero mucho!

## **A mi papá:**

Por creer en mí, por darme libertad para lograr mis sueños, por ayudarme a crecer como persona, por el cariño brindado y por estar presente en los buenos momentos.

¡Gracias!

## **A Felipe:**

Por acompañarme en esta trayectoria de aprendizaje y conocimientos.

Por tu comprensión, paciencia y dedicación en todo momento, por inyectarme ese ánimo para continuar lo que había empezado y por todo el apoyo que me has dado para continuar y seguir con mi camino.

Gracias por soportar todos mis errores y por hacerme vivir momentos inolvidables.

¡Te amo bolis!

## **A Fernando Vallejo:**

Por su gran amistad, confianza, apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de este trabajo terminal.

Por enseñarme diferentes maneras de ver y disfrutar la vida, por enseñarme a fortalecer mi carácter y a trabajar con mayor disciplina.

Gracias por sus consejos personales y académicos. Gracias por escucharme.

¡Mil Gracias!

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por haberme dado la existencia y permitido llegar al final de la carrera.

Agradezco a mis hermanas por lo momentos que compartimos juntas y por su paciencia.

Agradezco a Omar por compartir momentos familiares de alegría y de tristeza.

Agradezco a mis asesores, al M. en C. Leonardo Fonseca por la idea de este proyecto y por la confianza que depositó en mí y en mi trabajo. Al M. en C. Fernando Vallejo por todo su apoyo y tiempo invertido en este trabajo terminal y en su revisión.

Agradezco al Dr. Walter Fonseca por haber patrocinado este proyecto.

Agradezco a mi jurado evaluador, al Dr. Leonel Corona por aceptar participar en esta tarea. Al Ingeniero Erick López por la asesoría y tiempo brindado para la revisión de este trabajo.

Agradezco al Profesor Héctor Cruz por su valiosa aportación para hacer este proyecto aún más enriquecedor.

Un agradecimiento especial a los integrantes de Génesis Industrial, al Ingeniero Miguel Morales, al Ingeniero Ulises Morales, al Sr. Román y a Jesús por sus asesorías, tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a la familia Rocha Benítez por todos sus consejos, amistad y tiempo.

Así mismo agradezco a mis maestros, amigos y compañeros y a toda aquella persona que de alguna manera contribuyó al logro de una de mis metas... obtener mi título profesional.

*Mariel Arisbet*



## Contenido

Índice de Tablas	III
Índice de Figuras	IV
Resumen	VI
Objetivos	VII
<b>Capítulo 1. Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Antecedentes.</b>	<b>3</b>
2.1 Máquina Herramienta.	3
2.2 Máquina Fresadora.	3
2.3 Control Numérico por Computadora.	5
2.4 Estado del Arte.	6
<b>Capítulo 3. Planteamiento del Problema.</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 4. Desarrollo de la Propuesta.</b>	<b>11</b>
4.1 Sistema Mecánico.	11
4.1.1 Transmisión del movimiento lineal de los ejes XYZ	11
4.1.2 Elementos para el desplazamiento	13
4.1.3 Diseño mecánico de la máquina fresadora	14
4.2 Sistema Electrónico.	20
4.2.1 Motores.	20
4.2.2 Control de la posición de los motores a pasos	21
4.2.3 Fuente de poder	22
4.2.4 Límites de carrera.	23
4.3 Sistema de Control.	24
4.3.1 Transmisión de datos	24
4.4 Análisis de Costos del Sistema Electrónico.	26
4.5 Validación del Sistema Mecánico.	30



<b>Capítulo 5. Construcción del Prototipo.</b>	<b>33</b>
5.1 Construcción del sistema mecánico.	33
5.1.1 Maquinado de piezas	33
5.1.2 Ensamblado de piezas	39
5.2 Puesta en marcha del sistema electrónico	43
5.3 Puesta en marcha del sistema de control	43
<b>Capítulo 6. Pruebas.</b>	<b>48</b>
6.1 Puesta en marcha de la fresadora CNC	48
6.2 Pruebas con plumón	49
6.3 Pruebas con cortador	50
<b>Capítulo 7. Conclusiones.</b>	<b>52</b>
Referencias	<b>53</b>
Apéndices	<b>55</b>
Apéndice A. Hojas de Especificaciones de elementos mecánicos	55
Apéndice B. Planos de Fabricación	64
Apéndice C. Memoria de Cálculo	90
Apéndice D. Especificaciones del Kit Probotix	105
Apéndice E. Selección de Cortador Woodruff	120
Apéndice F. Costos	122



## Índice de Tablas

4.1. Costos de Sistema Electrónico.	26
4.2. Costo del Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver.	27



## Índice de Figuras

2.1. Diferentes tipos de cortadores	4
2.2. Fresadora vertical de tres ejes	5
2.3. Mini Fresadora CNC Sherline2000	7
2.4. Fresadora CNC SpectraLIGHT0200	7
2.5. Máquina Fresadora CNC	8
3.1. Propuesta de solución	10
4.1. Perfil del Tornillo embalado	12
4.2. Esquema de la tuerca embalada	12
4.3. Acoplamiento del tornillo embalado con la tuerca	12
4.4. Guía lineal de bolas	14
4.5. Estructura del prototipo de la mini fresadora	15
4.6. Estructura con guías lineales	15
4.7. Estructura con elementos de soporte de los husillos embalados	16
4.8. Mesa de Trabajo	17
4.9. Elementos de sujeción para la pieza de maquinado	17
4.10. Acoplamiento de tuerca y brida	17
4.11. Acoplamiento de silla, de brida y de guías deslizantes	18
4.12. Estructura mecánica para los movimientos de los ejes	18
4.13. Estructura para el mini taladro	19
4.14. Diagrama de las parte a estudiar para el desarrollo electrónico	20
4.15. Circuito Integrado LMD1845	21
4.16. Diagrama electrónico para el control de un motor a pasos	22
4.17. Diagrama electrónico para la fuente de poder	23
4.18. Sensor mecánico de límite de carrera	23
4.19. Diagrama electrónico de la tarjeta de transmisión de datos	25
4.20. Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver	27
4.21. Diseño final, vista frontal	28
4.22. Diseño final, vista lateral	29
4.23. Ensamble de Fresadora importado en Ansys®	30
4.24. Carga aplicada para la evaluación numérica	30
4.25. Deformación máxima de la columna	31



4.26. Deformación máxima sobre la base	31
4.27. Deformación Máxima de Cartabón izquierdo	32
4.28. Deformación Máxima de Cartabón derecho	32
5.1. Placas de Acero A36	33
5.2. Placas de Acero A36 con rectificado burdo	34
5.3. Rectificadora de superficies planas para placas pequeñas	34
5.4. Escuadrado de laterales	35
5.5. Barrenado de Laterales	35
5.6. Cortador Woodruff	36
5.7. Fotografías de la mesa de trabajo	36
5.8. Simulación en MasterCAM	37
5.9. Soportes para rodamientos	37
5.10. Rosca para brida	38
5.11. Brida con tuerca embalada	38
5.12. Unión de cartabones y base	39
5.13. Estructura con rieles del eje X y Y	39
5.14. Implementación de tornillos embalados de los ejes XYZ	40
5.15. Aplicación de Prymer	40
5.16. Ensamble de silla XY con brida y tuerca embalada	41
5.17. Ensamble de carros lineales	41
5.18. Ensamblado de mesa de trabajo.	42
5.19. Gabinete	43
5.20. Mach3	43
5.21. Configuración de puerto paralelo.	44
5.22. Configuración de ejes	44
5.23. Configuración de entradas	45
5.24. Configuración de área de trabajo	45
5.25. Configuración de los parámetros de los motores a pasos	46
5.26. Vista frontal de la Máquina Fresadora	46
5.27. Vista lateral de la Máquina Fresadora	47
5.28. Mini Fresadora CNC de Tres Ejes	47
6.1. Maquinado del rostro del personaje “La Mole”.	49
6.2. Personajes de Mafalda	50
6.3. Logo de UPIITA	50
6.4. Escudo del IPN	51
6.5. Octágono	51



---

## Resumen

---

### Mini Fresadora CNC de Tres Ejes

**Palabras Clave:** Fresadora, CNC, Tres ejes Coordinados, Mach3.

**Resumen:**

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir una máquina herramienta de fresado de tres ejes coordinados con control numérico computarizado (CNC), haciendo uso de guías lineales, tornillos de bolas y códigos G para realizar el maquinado de piezas con dimensión máxima de 209 x 152 x 152 milímetros.

**Abstract:**

The objective of this work is to design and build a milling machine tool with three coordinate axes with computer numerical control (CNC), using linear guides, ball screws and G codes for machining parts with maximum dimensions of 230 x 180 x 150 millimeters.



---

## Objetivos

---

### Objetivo general

Desarrollar un prototipo de mini fresadora vertical con Control Numérico por Computadora con tres ejes de desplazamiento XYZ

### Objetivos particulares

La mesa de trabajo de la mini máquina fresadora podrá desplazarse en los ejes X y Y, mientras que el eje Z será para la herramienta de corte. Para obtener el prototipo de la mini fresadora se seguirán los siguientes puntos:

- Diseñar y construir la estructura mecánica de la mini fresadora con capacidad de maquinar piezas con una dimensión máxima de 230 x 180 x 150 mm.
- Diseñar y construir las tarjetas de control para la puesta en marcha del prototipo.
- Implementar un control de velocidad para el motor del husillo.
- Construir el panel de control con la ayuda de una computadora y el software Mach3.
- Posibilidad de utilizar brocas con zanco hasta de 1/2".
- Capacidad de maquinar metales no ferrosos y plásticos tales como aluminio, bronce, latón, acero, nylamid, etc.



---

## Capítulo 1

---

### Introducción

---

En la actualidad el avance de la industria en nuestro país requiere de sistemas y elementos de producción que reduzcan la cadena de suministro en la fabricación de productos con el objetivo de lograr una línea de producción esbelta que procure la elaboración de productos de calidad a bajos costos.

Las máquinas automatizadas se han posicionado en las últimas décadas como un paradigma en la industria que cumplen con los objetivos de producción, debido a que son utilizadas en la integración de sistemas o en la manufactura de piezas para un ensamble. Ésta última tarea se realiza con los centros de maquinado de control numérico, como los tornos y fresadoras CNC, pues permiten el maquinado de diferentes formas en diversos materiales, dependiendo de la capacidad que éstas tengan.

Las fresadoras CNC, por excelencia, son la opción para la elaboración de trabajos que requieren un alto volumen de producción en periodos de tiempo cortos.

A pesar de la gran demanda de estas máquinas, los costos de adquisición son muy elevados, lo que representa un problema para las pequeñas y medianas empresas de producción; por lo tanto utilizan fresadoras CNC pequeñas.

Dada la importancia que tienen las máquinas pequeñas de fresado CNC en el mercado, en este trabajo terminal se diseña y construye una mini fresadora con control numérico por computadora de tres ejes que sea competitiva con las ofrecidas en el mercado.

Por ello, en el siguiente capítulo se describe de forma general qué es una máquina herramienta, qué es una fresadora, qué es el control numérico por computadora y se dan a conocer las máquinas con las que se desea competir.



En el tercer capítulo se plantea el problema que intenta resolver este proyecto.

En el siguiente capítulo se dan a conocer las características de las partes que conforman el prototipo, así como la justificación de su elección.

La descripción de la construcción del prototipo se muestra en el capítulo cinco. Mientras que los resultados de las pruebas durante la operación del sistema construido están en el capítulo seis.

Por último, se encuentran las conclusiones y recomendaciones para un mejor funcionamiento de la máquina diseñada.

Finalmente se presenta una serie de apéndices de las hojas de datos de los dispositivos mecánicos utilizados, de los planos de fabricación, de los diagramas de conexiones y una memoria del cálculo del diseño de la fresadora.



---

## Capítulo 2

---

### Antecedentes

---

#### 2.1. Máquina Herramienta.

Una **máquina herramienta** es un tipo de máquina<sup>1</sup> que se utiliza para dar forma a materiales sólidos, principalmente metales. Su característica principal es su falta de movilidad, ya que suelen ser máquinas estacionarias. El modelado de la pieza se realiza por la eliminación de una parte del material, que se puede efectuar por arranque de viruta, estampado, troquelado, corte o electroerosión.

Las máquinas herramientas se clasifican dependiendo del número de ejes con que se cuenta 2, 3, 4, 5, etcétera. Este número es la cantidad de movimientos que existen entre la pieza y la herramienta.

Las máquinas herramientas convencionales son el torno, el taladro, la prensa, la pulidora y la fresadora; éstas tienen en común la utilización de una herramienta de corte específica y pueden operarse manualmente o mediante control automático.

#### 2.2. Máquina Fresadora.

La máquina fresadora es una herramienta que se utiliza para producir con precisión una o más superficies maquinadas sobre una pieza de un determinado material; esto se efectúa mediante una o más herramientas de corte giratorias. Esta máquina es muy versátil lo que la convierte en una de las máquinas herramientas más importantes y utilizadas en operaciones de taller de maquinado.

---

<sup>1</sup> Máquina. Conjunto de piezas o elementos móviles y fijos articulados que a través de sus movimientos relativos transforman energía o realizan un trabajo con un fin determinado.

Su operación de maquinado es desarrollada cuando la pieza, que se encuentra montada sobre la mesa principal de la máquina, avanza en forma longitudinal, transversal o vertical y entra en contacto con la herramienta de corte que se encuentra girando en el husillo.

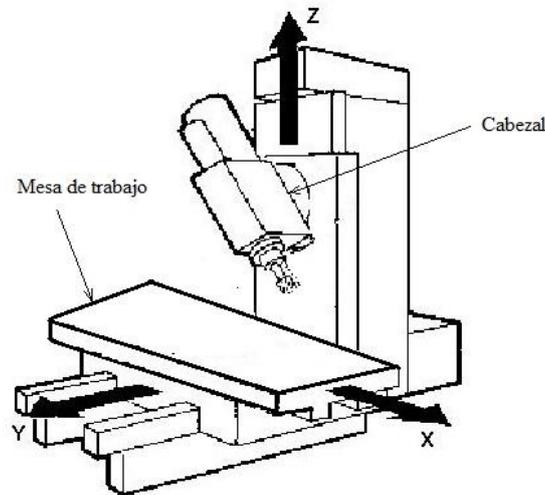
La herramienta de corte de ésta máquina es denominada **cortador para fresado**. El cortador es un dispositivo circular que cuenta con varios puntos de corte. Los dientes cortantes de éstos pueden ser rectilíneos o helicoidales, de perfil recto o formando un ángulo determinado. La figura 2.1 muestra algunos tipos de cortadores.



**Figura 2.1. Diferentes tipos de cortadores.**

Las fresadoras pueden clasificarse según la orientación del eje de giro de la herramienta de corte o el número de ejes de operación. Dependiendo del eje de giro de la herramienta se distinguen tres tipos de fresadoras: horizontales, verticales y universales.

La máquina fresadora vertical se encuentra en la mayoría de los talleres y tiene un uso más amplio que la fresadora horizontal. La fresadora vertical es una máquina de tres ejes y el movimiento más largo que realiza la mesa de trabajo, en dirección longitudinal se le denomina eje X, el movimiento transversal que es el desplazamiento corto de la mesa, es denominado eje Y y al movimiento del eje principal donde se encuentra el cabezal quien porta la herramienta de corte, se le denomina eje Z (ver figura 2.2). Las fresadoras que cuentan con más de tres ejes contienen ejes paralelos u oblicuos al eje principal.

**Figura 2.2. Fresadora vertical de tres ejes.**

Actualmente existen fresadoras que también pueden ser comandadas con control numérico por computadora; sin embargo el costo de estas máquinas es muy elevado.

### **2.3. Control Numérico por Computadora.**

El **control numérico por computadora (CNC)** puede definirse como un método para controlar con precisión la operación de una máquina mediante una serie de instrucciones codificadas formadas por números, letras del alfabeto y/o símbolos que la unidad de control de la máquina puede comprender, como lo son los códigos G y M. Así pues una máquina fresadora con control numérico por computadora (fresadora CNC) lleva a cabo más operaciones sobre una pieza en una sola vez, sin tener que reacomodarla manualmente [1].

Una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Gracias a esto, se pueden hacer movimientos con más facilidad como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales. Además de proporcionar alta precisión de corte, alta eficiencia en el mecanizado y repetitividad.

Una máquina con control numérico por computadora está constituida por numerosos componentes y puede ser dividida en dos partes: en la máquina herramienta y en el controlador o computadora.

La máquina herramienta ya se mencionó anteriormente.



El controlador o computadora interpreta el programa para coordinar los movimientos de las diferentes partes de la máquina. Este programa debe contener la denominación de las herramientas a utilizar, las velocidades de movimiento, los avances, las distancias, las operaciones a realizar, cuándo, dónde y hasta qué punto inician o terminan las instrucciones o ciclos. El programa puede ser cargado a la máquina CNC directamente por el teclado existente en ella, o por medios externos adicionales, elaborándolo inicialmente en una terminal externa y posteriormente grabándolo en la memoria de la máquina.

Los sistemas CNC son el puente de unión entre el operador y la máquina herramienta, para realizarlos se necesitan dos interfaces: la interfaz gráfica y la interfaz de control.

- La **interfaz gráfica** que consta de un panel de control conformado por dispositivos de almacenamiento e impresión de la información.
- La **interfaz de control** la cual realiza la comunicación entre el controlador y los actuadores de la máquina herramienta.

## **2.4. Estado del Arte.**

Las máquinas de fresado CNC tienen gran demanda en el sector industrial; por ejemplo, en la industria automotriz, estas máquinas se utilizan para realizar el mecanizado de algunas partes de los automóviles que requieren de gran precisión o para hacer los moldes de inyección, entre otros. Sin embargo, el tener una máquina de tal magnitud sólo para maquinar piezas pequeñas, presenta algunas desventajas como el costo de adquisición (\$35,000.00 - \$110,000.00 USD), el costo de mantenimiento y el espacio que requiere. Es por ello, que desde hace más de tres décadas se fabrican máquinas de fresado con control numérico por computadora con área de trabajo pequeña (no más de 30 cm por eje). Algunos ejemplos de ellas son:

- Sherline 2000

Esta fresadora CNC cuenta con tres ejes de trabajo (figura 2.3) y fue desarrollada por la empresa estadounidense Sherline [2]. Sus características son las siguientes:

Longitud máxima del eje X: 209 mm.  
Longitud máxima del eje Y: 158 mm.  
Longitud máxima del eje Z: 137 mm.  
Resolución de movimiento: 0.01 mm.  
Costo: \$34,543.80<sup>2</sup> M.N (\$2,700 USD).



**Figura 2.3. Mini Fresadora CNC Sherline2000.**

➤ SpectraLIGHT0200

Este modelo es observado en la figura 2.4, fue fabricado en aluminio por la empresa norteamericana Intelitek [3]. Esta máquina cuenta con las siguientes características:

Longitud máxima del eje X: 216 mm.  
Longitud máxima del eje Y: 114 mm.  
Longitud máxima del eje Z: 140 mm.  
Resolución de movimiento: 0.001 mm.  
Costo: \$120,330.00<sup>3</sup> M.N. (\$10,000 USD)



**Figura 2.4. Fresadora CNC SpectraLIGHT0200.**

<sup>2</sup> Precio cotizado el 03/02/11, dólar en \$12.033, Banco de México.

<sup>3</sup> Precio cotizado el 03/02/11, dólar en \$12.033, Banco de México.

➤ Máquina Fresadora CNC

En el Trabajo Terminal II Cristian Rodrigo García Pérez, alumno de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA), diseñó y construyó la “Máquina Fresadora CNC” [4], la cual se puede observar en la figura 2.5 y cuenta con las siguientes características:

Longitud máxima del eje X: 150 mm.

Longitud máxima del eje Y: 100 mm.

Longitud máxima del eje Z: 50 mm.

Resolución de movimiento: 0.01 mm.

Costo: \$25,000.00 M.N.



**Figura 2.5. Máquina Fresadora CNC.**

➤ Mini Fresadora de Control Numérico Computarizado

En el Trabajo Terminal II tres estudiantes de la UPIITA, diseñaron y construyeron la Mini Fresadora de Control Numérico Computarizado, la cual cumplió con la siguiente área de trabajo [5]:

Longitud máxima del eje X: 100 mm.

Longitud máxima del eje Y: 200 mm.

Longitud máxima del eje Z: 100 mm.

Costo: No se tiene información.



## Capítulo 3

---

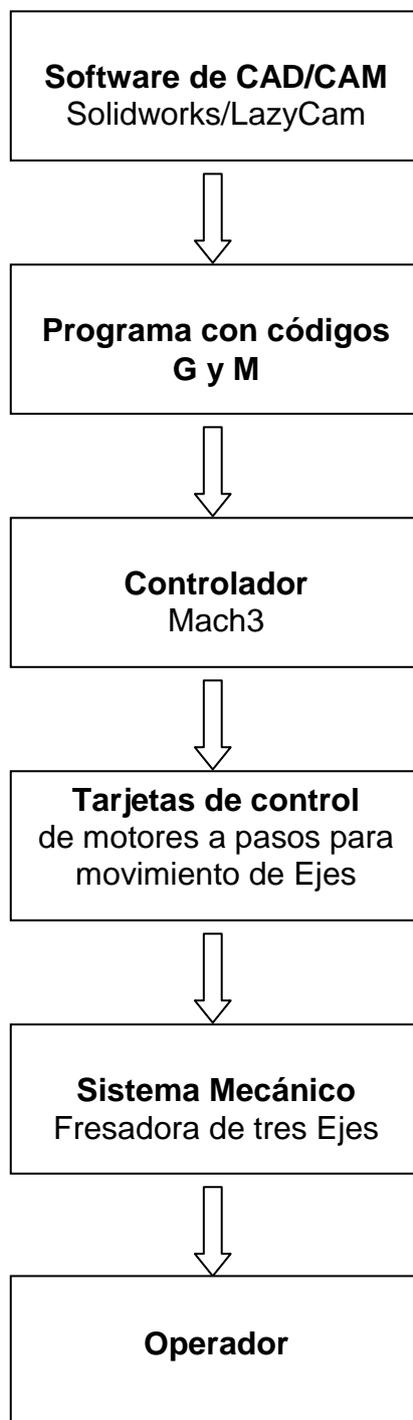
### Planteamiento del problema

---

Actualmente, las máquinas fresadoras CNC son utilizadas en diversos sistemas de manufactura y sectores industriales, pues han alcanzado altos niveles de precisión y producción. Sin embargo, la mayoría de estas pequeñas máquinas son fabricadas en el extranjero a un precio que oscila entre 2,545 dólares a 15,000 dólares. El precio fluctúa debido al costo de los materiales usados en su producción (aluminio, hierro colado, etc.) o a los mecanismos de transmisión de movimiento utilizados, como colas de milano, guías lineales, tornillos ACME, husillos embalados, entre otros; a esto hay que sumarle los costos de envío. Por lo anterior, se pretende realizar un prototipo de una mini fresadora CNC de menor costo.

Asimismo, se pretende que el prototipo tenga características diferentes a las dos máquinas que se realizaron anteriormente en la UPIITA. Una diferencia es el área de trabajo, pues las construidas anteriormente cuentan con una capacidad de maquinar piezas con dimensión máxima de 150 x 100 x 50 y 100 x 200 x 100 milímetros. Mientras que este prototipo podrá maquinar piezas con máxima dimensión de 209 x 152 x 152 milímetros. Otra característica distinta es el uso de los sistemas de transmisión de movimiento, ya que las dos primeras máquinas fueron construidas con colas de milano y ésta contará con guías lineales. Además, el software de control que se utilizará para este prototipo será Mach3, el cual no fue utilizado en los trabajos terminales anteriores.

La propuesta de solución que se plantea en el presente trabajo se muestra en el diagrama de la figura 3.1:



**Figura 3.1. Propuesta de Solución.**



## Capítulo 4

---

### Desarrollo de la Propuesta

---

Para la construcción de la mini fresadora CNC se necesita de la sinergia de tres sistemas: mecánico, electrónico y de control; los cuales se describirán enseguida.

#### **4.1. Sistema Mecánico.**

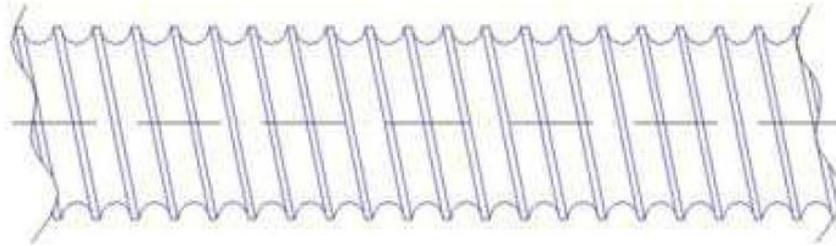
El sistema mecánico de este prototipo, es la máquina herramienta sin motores ni elementos de control, es decir, es la estructura de la fresa, más los mecanismos que permiten el movimiento en los diferentes ejes y sus respectivos acoplamientos.

##### **4.1.1. Transmisión del movimiento lineal de los ejes XYZ.**

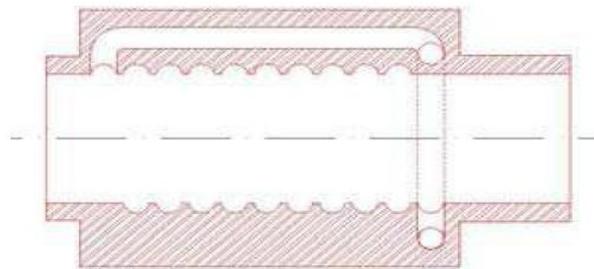
Se utilizarán tres motores para dar movimiento a los ejes XYZ; sin embargo se necesita de un mecanismo de transmisión que transforme su movimiento circular en rectilíneo para realizar los desplazamientos de la mesa y de la herramienta de corte.

Se seleccionó el mecanismo de tornillo y la tuerca, los ejes de transmisión de ambos elementos son perpendiculares entre sí, por lo que no ocupa mucho espacio. Este mecanismo funciona cuando el tornillo es fijo (no puede desplazarse longitudinalmente) y al girar provoca el desplazamiento de la tuerca.

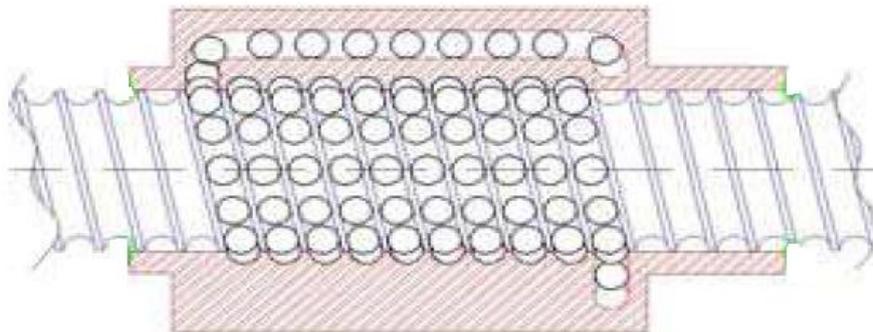
Debido a que la mini fresadora requiere de gran precisión para los maquinados, se seleccionaron husillos embalados (también llamados husillos de bolas) con sus respectivas tuercas ya que éstos presentan un perfil semicircular, como se muestra en la figura 4.1.

**Figura 4.1. Perfil del Tornillo embalado.**

Por otra lado, la tuerca lleva la otra mitad de la circunferencia (ver figura 4.2). Esta circunferencia tiene la finalidad de guiar una línea de balines que corre a lo largo de la cuerda del tornillo. Dentro de la misma tuerca existe un canal que permite a los balines correr libremente y regresar desde el último hasta el primer filete.

**Figura 4.2. Esquema de la tuerca embalada.**

El acoplamiento del tornillo embalado y de la tuerca se muestra ilustra en la figura 4.3.

**Figura 4.3. Acoplamiento del tornillo embalado con la tuerca.**

Las ventajas del tornillo embalado son:

- ✓ Alta precisión en movimiento y posicionamiento
- ✓ Disminución de juego mecánico axial
- ✓ Coeficiente de fricción bajo



- ✓ Disminución en la potencia de arrastre debido a que la tuerca rueda sobre balines
- ✓ Suavidad de operación y alto rendimiento

Se mantuvo contacto con la empresa BARMEX [6] para la compra de los husillos embalados y se adquirieron tres tornillos y tuercas embaladas THOMSON™ con número de parte 5707540 y 7820827 respectivamente.

Los datos técnicos de los husillos de bolas adquiridos, según el catálogo del fabricante (ver Apéndice A) son los siguientes:

- Diámetro exterior: 0.631 pulgadas
- Diámetro de raíz: 0.48 pulgadas
- Paso: 0.2 pulgadas
- Diámetro de balón: 0.125 pulgadas

#### **4.1.2. Elementos para el desplazamiento.**

El husillo de bolas es el encargado de transformar el movimiento circular de los motores en movimiento lineal, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, se necesita de la ayuda de otros elementos para realizar el desplazamiento de la mesa en los ejes X, Y y el de la herramienta de corte en el eje Z.

Se contemplaron dos opciones:

1. Fabricar colas de milano
2. Implementar guías lineales

Se eligió la segunda opción ya que las guías líneas presentan las siguientes ventajas:

- ✓ Movimiento lineal de precisión
- ✓ Pérdida de movimiento despreciable
- ✓ Coeficiente de fricción 0.01 o menor
- ✓ Disminución del juego axial debido a la precarga
- ✓ Rigidez estática alta
- ✓ Mayor rango de velocidades, desde bajas hasta altas
- ✓ Larga vida útil

Las guías lineales constan de un riel y una guía deslizante (también nombrado carro). Las bolas ruedan sobre las pistas del riel y la guía deslizante y son sostenidas por tapas en los extremos de la guía deslizante. La figura 4.4 ilustra lo que es una guía lineal.

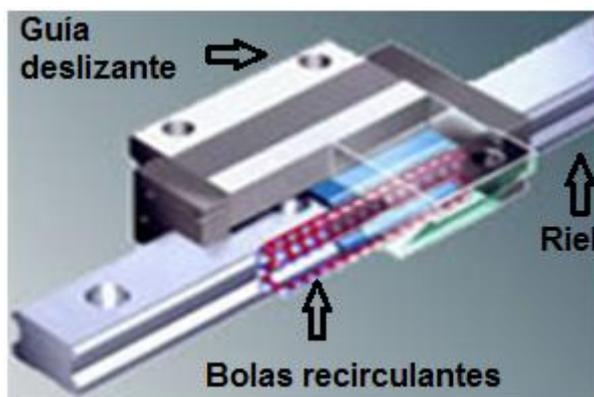


Figura 4.4. Guía lineal de bolas.

Con BARMEX se adquirieron seis rieles (dos para cada eje) y doce carros (dos para cada riel). Las dimensiones de los rieles y de los carros se muestran en el Apéndice A.

#### 4.1.3. Diseño mecánico de la máquina fresadora.

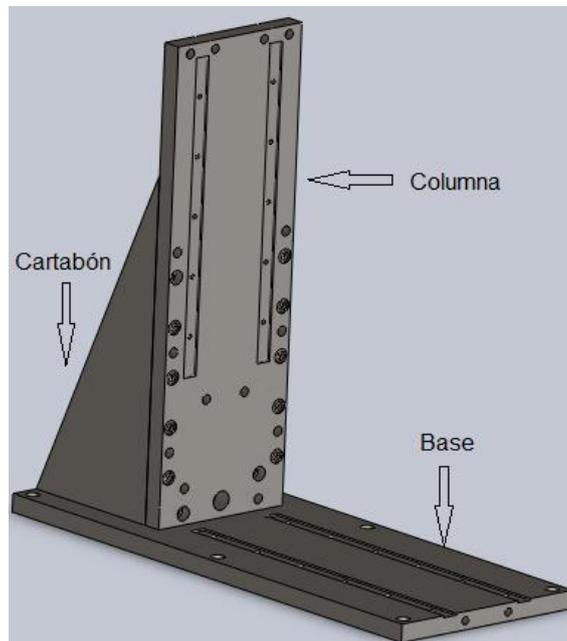
Después de haber determinado los mecanismos de movimiento se procede a realizar el CAD<sup>4</sup> en el software SOLIDWORKS<sup>®</sup> de la estructura que portará dichos elementos.

#### Estructura

Para la colocación de los rieles se necesitan bases planas; por lo cual se proponen dos placas: una horizontal (a la cual se le nombrará base) que servirá para colocar las guías lineales del eje Y y otra vertical (la cual recibirá el nombre de columna), para las del eje Z. A la unión perpendicular de estas placas por medio de tornillos y pernos de registro, los cuales ayudarán a que éstas queden fijas, se le nombrará estructura.

A la estructura se le adicionarán dos cartabones, en la parte posterior de la columna, esto con la finalidad de soportar más carga. La estructura se ilustra en la figura 4.5.

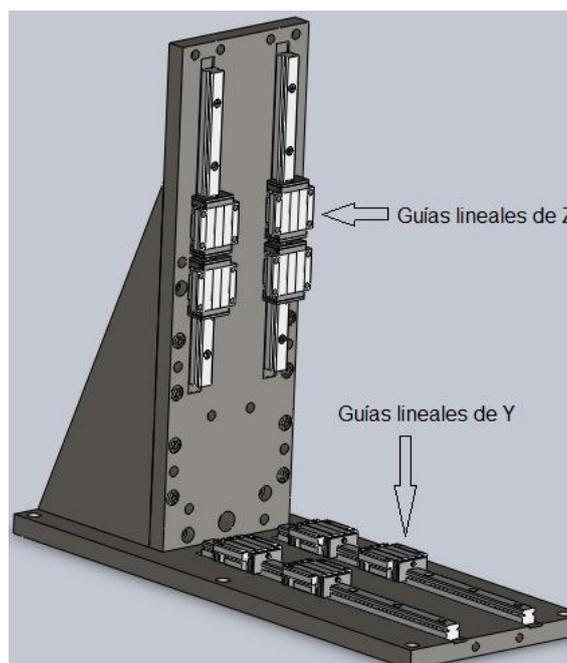
<sup>4</sup> Diseño asistido por computadora.



**Figura 4.5. Estructura del prototipo de la mini fresadora.**

Se realizará el desbaste de un par de ranuras en la base y columna del tamaño de los rieles, con el objetivo de centrar las guías lineales y mantener el paralelismo entre los rieles.

En la figura 4.6 se muestra la estructura con las guías lineales para el eje Y y Z.



**Figura 4.6. Estructura con guías lineales.**

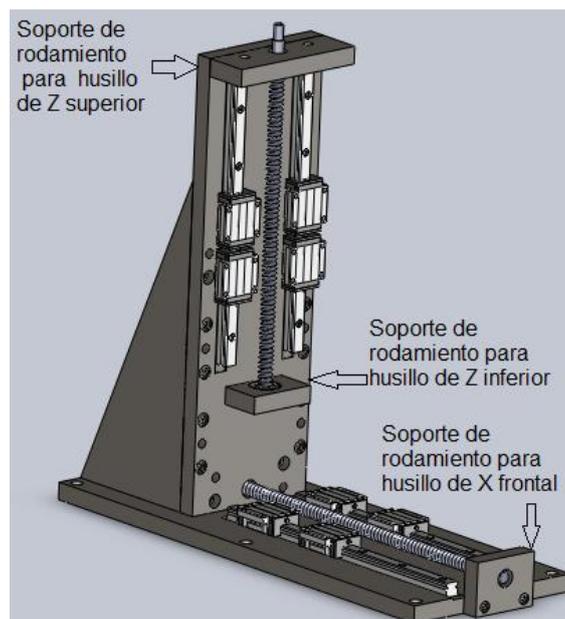
### Sujeción de los husillos

Para colocar los husillos de bolas sobre la estructura, se debe colocar un elemento mecánico que sirva de apoyo y que permita el libre giro de éste.

El elemento seleccionado fue el rodamiento ya que reduce la fricción entre el eje y las piezas conectadas a éste. Se compraron seis rodamientos de bolas FAG tipo 6201.2ZR.C3 (uno para cada extremo del tornillo) [7]. Los datos técnicos de éstos se encuentran en el apéndice A.

El alojamiento de los rodamientos será a través de placas pequeñas, las cuales serán ubicadas a los extremos de la base y la columna.

En la figura 4.7 se observa la estructura del prototipo con la implementación de los husillos, de los rodamientos y de sus alojamientos.

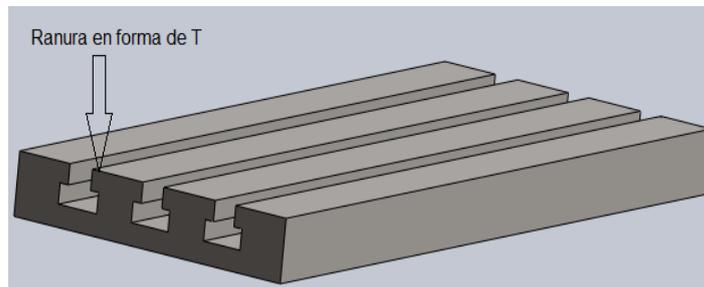


**Figura 4.7.** Estructura con elementos de soporte de los husillos embalados.

### Mesa de Trabajo

La mesa de trabajo será manufacturada con ranuras T para sujetar la pieza a maquinarse con el juego, tornillos, bridas, torres y tuercas en forma T de 3/8 de pulgada.

La figura 4.8 ilustra la mesa ranurada a manufacturar; mientras que la figura 4.9 muestra los elementos de sujeción de 3/8 de pulgada para la mesa con ranuras T.



**Figura 4.8. Mesa de Trabajo.**

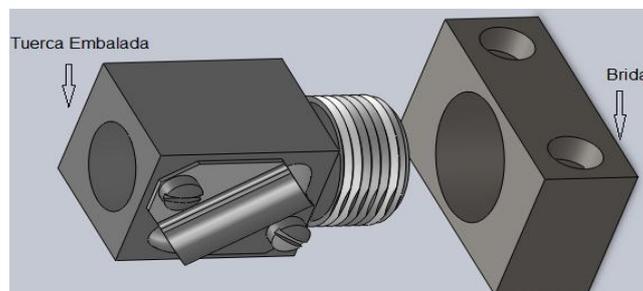


**Figura 4.9. Elementos de sujeción para la pieza de maquinado.**

### Desplazamiento de la mesa en XY y de la herramienta de corte en Z

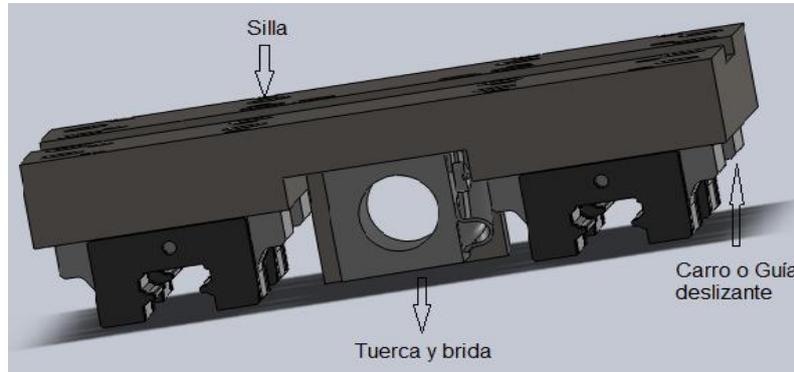
Para que la tuerca embalada transmita el movimiento lineal hacia la mesa de trabajo, se requiere de una brida<sup>5</sup> que acople la tuerca de bolas con una placa que deslizará los carros a través de los rieles, a la cual llamaremos silla.

En la figura 4.10 se puede observar el acoplamiento de la tuerca con la brida y en la figura 4.11 el acoplamiento de la tuerca, la brida, la silla y los carros.



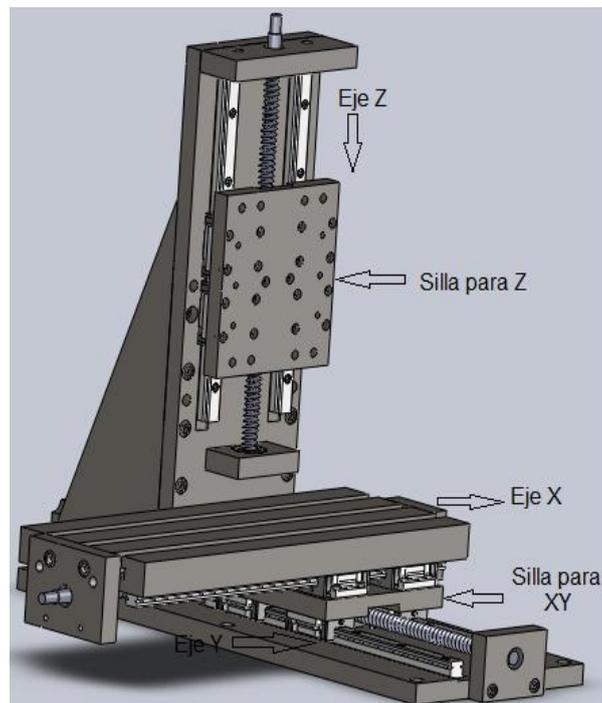
**Figura 4.10. Acoplamiento de tuerca y brida.**

<sup>5</sup> Elemento de unión entre dos piezas.



**Figura 4.11. Acoplamiento de silla, de brida y de guías deslizantes.**

Observando la figura 4.12, la cual ilustra la estructura de la fresadora con las piezas que permiten el movimiento de la mesa de trabajo, nos damos cuenta que los mecanismos utilizados para el movimiento del eje Y quedan por debajo de la silla; mientras que los del eje X están por arriba de la silla.



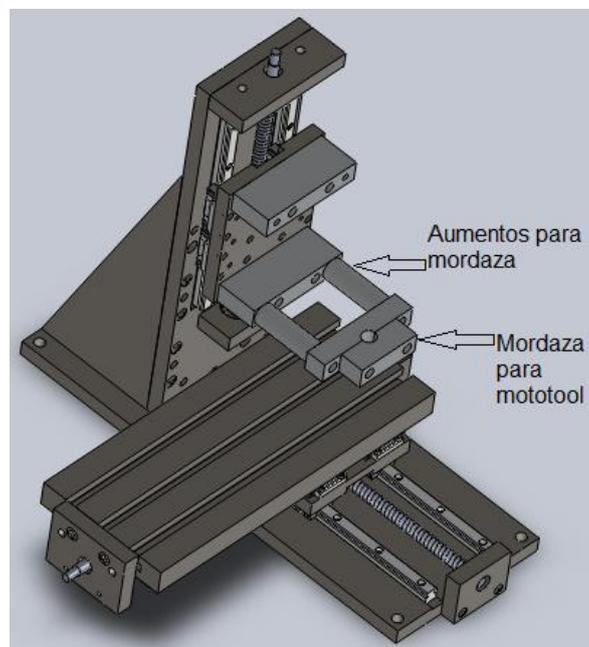
**Figura 4.12. Estructura mecánica para los movimientos de los ejes.**

### Acoplamiento del porta herramienta de trabajo

La herramienta de trabajo será montada sobre un mini taladro (mototool), el cual presenta las siguientes características:

- Motor de 0.95 A @ 115V, 60 Hz AC, 1/15 Hp.
- Boquilla de 1/8
- Velocidad de 25,000 RPM

Por ello, se diseñaron aumentos para sujetar las mordazas (figura 4.13) que a su vez sujetaran al mini taladro.



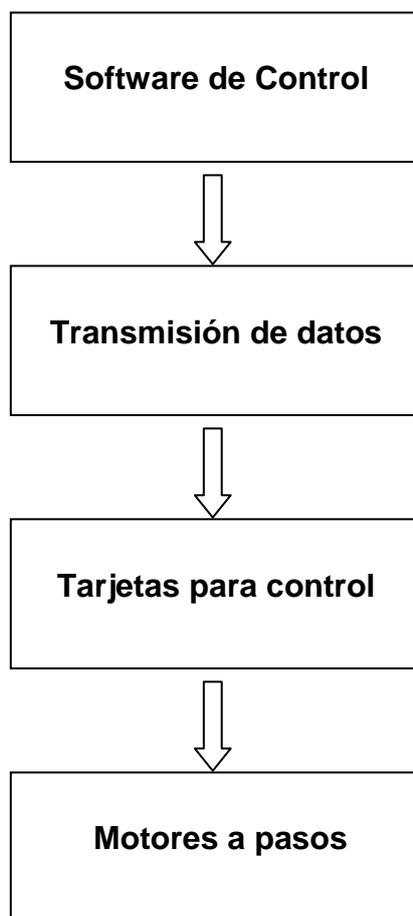
**Figura 4.13. Estructura para el mini taladro.**

Es pertinente señalar que la estructura, la mesa en ranuras T, las bridas, las sillas y los soportes de rodamientos para los husillos se fabricarán en Acero A36 ya que se trata de un material con alta tenacidad y bajo costo de adquisición. La mordaza y los aumentos para ésta se fabricarán en Aluminio 1045 debido a que es un material blando y maleable.

Los planos de fabricación se encuentran en el Apéndice B.

## 4.2. Sistema Electrónico.

Para poder elegir de forma correcta los dispositivos electrónicos se debe tener en cuenta cada una de las partes que serán controladas. En el diagrama a bloques de la figura 4.14 se muestran cada una de las etapas a estudiar, de esta manera se ve cuáles son las necesidades y con qué dispositivos se puede dar solución a ellas.



**Figura 4.14.** Diagrama de las parte a estudiar para el desarrollo electrónico.

### 4.2.1. Motores.

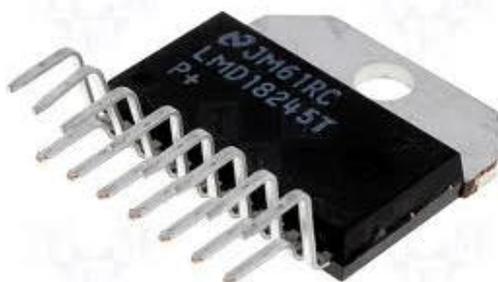
Los motores seleccionados para mover los ejes de XYZ son los motores a pasos ya que en su interior llevan un arreglo de bobinas y dependiendo de la velocidad del cambio de pulsos que exista entre ellas, variará la velocidad, aceleración y posición de la flecha; lo cual nos es fácil de controlar en un motor de imán permanente de corriente continua.

Después de haber calculado el par necesario para mover los ejes XYZ (ver cálculos en el Apéndice C) se contactó a la empresa estadounidense PROBOTIX [8] para cotizar:

- Dos motores a pasos Green Monster HT23-400-8, los cuales presentan las siguientes características:
  - Par mecánico 400 OzIn (2.82 N-m)
  - $1/8^{\circ}/200$  pasos por revolución
  - 3 Amperes por fase
  - 8 cabe unipolares o bipolares
  - NEMA<sup>6</sup> 23
  - Doble flecha
  
- Un motor a pasos HT23-280-8, el cual posee:
  - Par mecánico 280 OzIn (1.98 N-m)
  - $1/8^{\circ}/200$  pasos por revolución
  - 3 Amperes por fase
  - 8 cabe unipolares o bipolares
  - NEMA 23
  - Doble flecha

#### 4.2.2. Control de la posición de los motores a pasos.

Para las tarjetas de control de los motores a pasos se pretende usar el circuito integrado LMD18245 (figura 4.15) que permite controlar un motor paso a paso bipolar hasta de 3A y obtener hasta 10 micro-pasos por cada paso, con la finalidad de obtener una mejor resolución en el movimiento de los ejes de la fresadora. Se utilizan dos integrados por cada motor.



**Figura 4.15. Circuito Integrado LMD1845.**

---

<sup>6</sup> Asociación Nacional de Fabricantes, responsable de numerosos estándares industriales comúnmente usados en el campo de la electricidad.

El diagrama electrónico propuesto para la tarjeta de control se muestra en la figura 4.16.

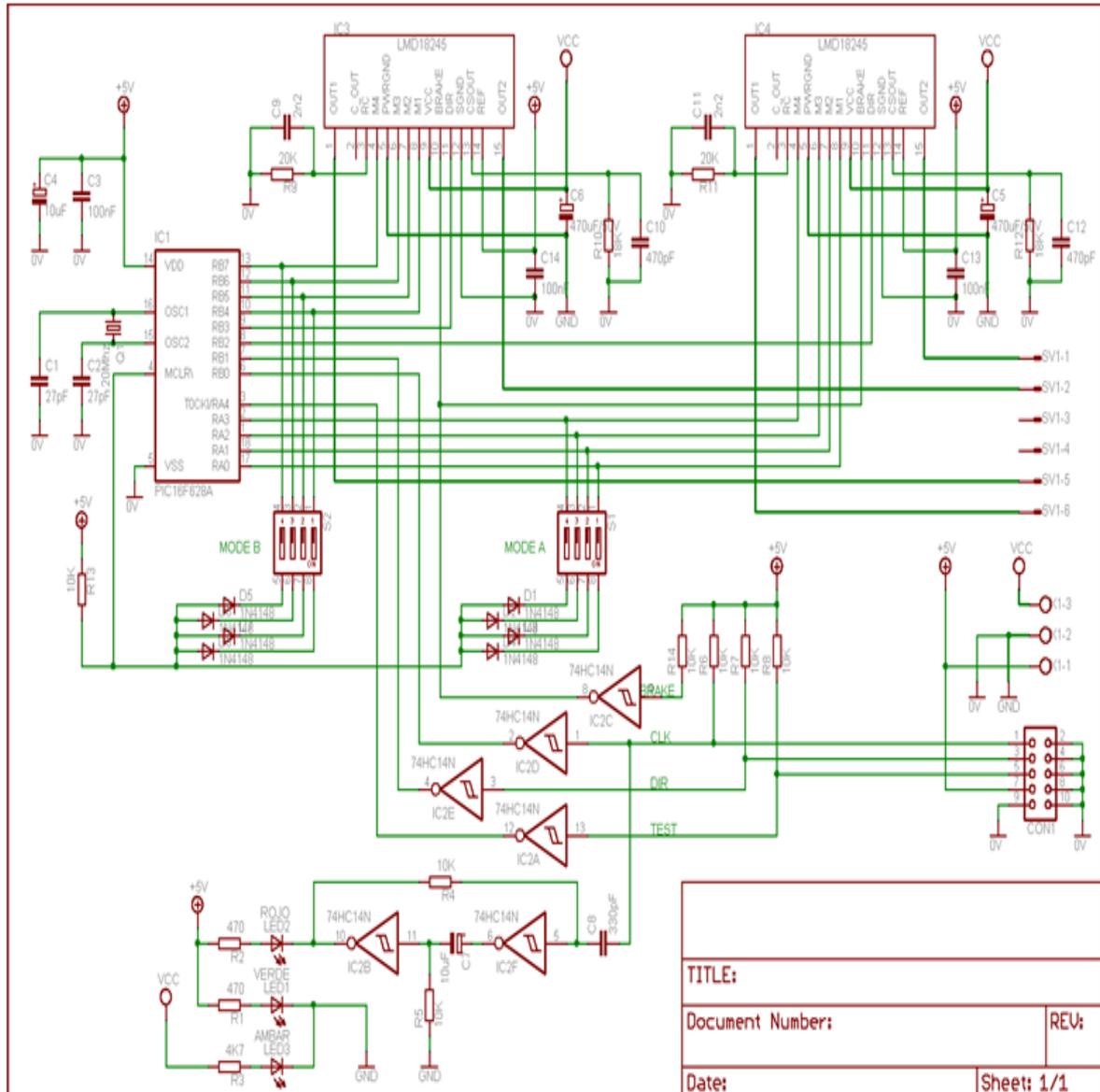


Figura 4.16. Diagrama electrónico para el control de un motor a pasos.

### 4.2.3. Fuente de poder.

Para diseñar la fuente de salida se debe conocer:

- la corriente de salida: 3A
- la tensión de salida: 24V

Conociendo los requerimientos se realizó el siguiente diagrama para la construcción de la fuente de poder. Ver figura 4.17.

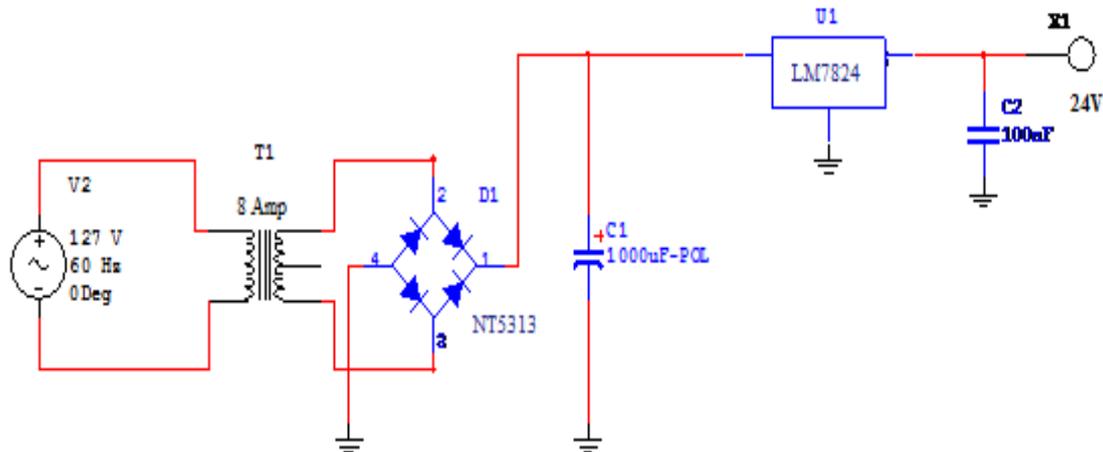


Figura 4.17. Diagrama electrónico para la fuente de poder.

#### 4.2.4. Límites de carrera.

Para proteger a las guías lineales se implementan sensores mecánicos, micro-switches de palanca, que funcionan para delimitar el área de trabajo e impedir que los carros se salgan de los rieles. La figura 4.18 muestra uno de los sensores utilizados.



Figura 4.18. Sensor mecánico de límite de carrera.



### **4.3. Sistema de Control.**

En este caso, el sistema de control se consiguió por medio del software Mach3 ya que permite controlar equipos como tornos, fresadoras, routers y equipo de corte por plasma o por láser.

Este controlador permite realizar las siguientes funciones:

- ✓ Controlar hasta seis ejes de movimiento
- ✓ Visualizar en la pantalla los códigos G y las gráficas tridimensionales que éstos producen
- ✓ Personalizar la interfaz gráfica
- ✓ Personalizar códigos M
- ✓ Controlar la velocidad del husillo
- ✓ Compatibilidad con pantallas táctiles

Los requerimientos para la instalación del software son:

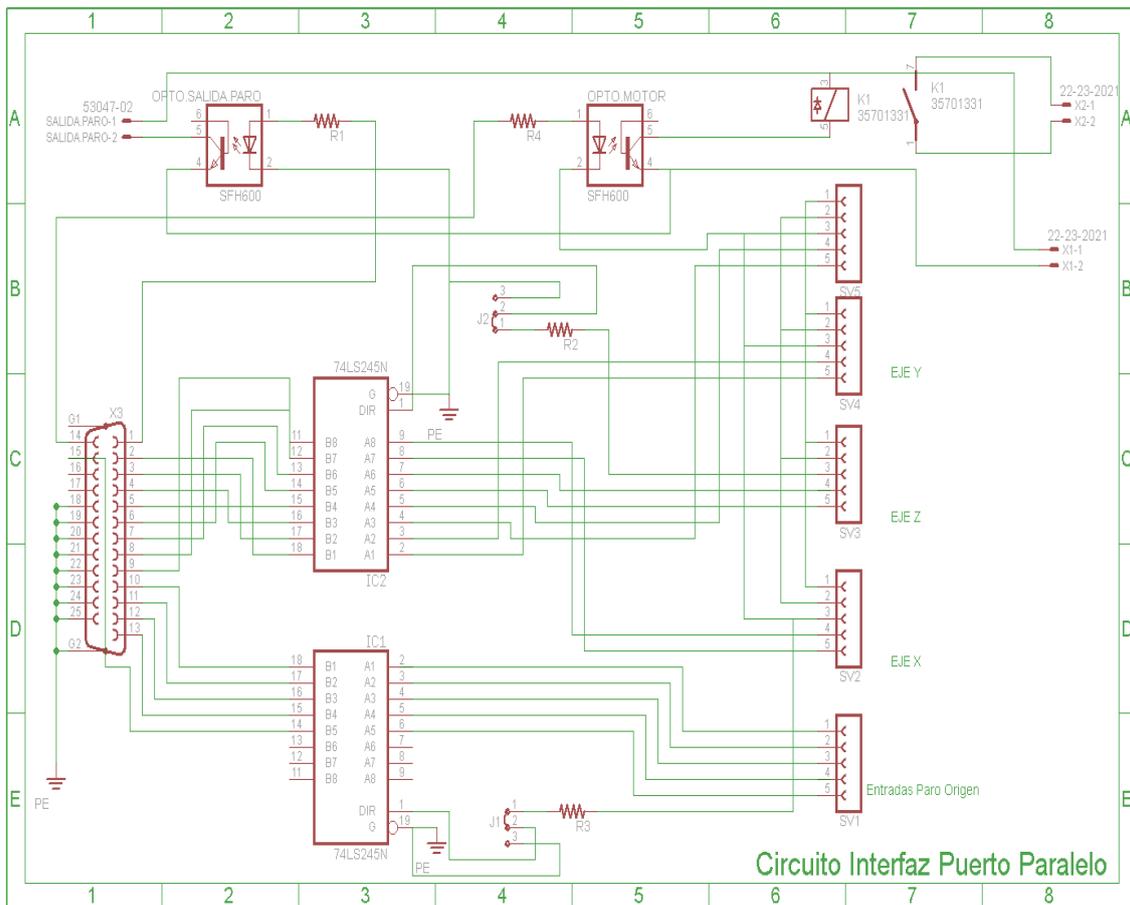
- Sistema operativo Windows (XP, Vista, Windows 7) de 32 bits
- Procesador de 1Ghz
- 512MB en RAM
- Resolución de pantalla 1024 x 78 pixeles
- Comunicación por puerto LPT (paralelo) o puerto COM (serial)

#### **4.3.1. Transmisión de datos.**

Como se mencionó anteriormente, uno de los requerimientos para la transmisión de datos es el uso de puerto paralelo o serie.

Se elige utilizar el puerto LPT debido a que se usará una computadora portátil para este trabajo, la cual cuenta con un puerto paralelo.

Entonces el diseño propuesto de la tarjeta electrónica para la comunicación de datos es el siguiente:



**Figura 4.19. Diagrama electrónico de la tarjeta de transmisión de datos.**

Esta tarjeta se basa en el circuito integrado SN74LS245, el cual transfiere datos entre las tarjetas de control de motores a pasos y el controlador Mach3, usando conectores DB25.



#### 4.4. Análisis de Costos del Sistema Electrónico.

El costo de la construcción del sistema electrónico es \$5,976.70 y se puede ver desglosado en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Tabla de Costos de Sistema Electrónico.

	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
<b>MOTORES:</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>Motores a pasos HT23-400-8</li></ul>	2	\$ 973	\$1946
<ul style="list-style-type: none"><li>Motor a pasos HT23-280-8</li></ul>	1	\$694.80	\$694.80
<b>TARJETAS DE CONTROL DE MOTORES:</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>Circuito integrado LMD1845</li></ul>	6	\$283.90	\$1703.4
<ul style="list-style-type: none"><li>Microcontrolador</li></ul>	3	\$65.20	\$195.60
<b>FUENTE:</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>Circuito Integrado LM7824</li></ul>	3	\$128.70	\$128.7
<ul style="list-style-type: none"><li>Transformador</li></ul>	1	\$560.00	\$560.00
<ul style="list-style-type: none"><li>Puente rectificador</li></ul>	1	\$32.00	\$32.00
<b>TARJETA DE TRANSMISIÓN DE DATOS:</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>Circuito integrado SN74LS245</li></ul>	2	\$25.10	\$50.20
<ul style="list-style-type: none"><li>Conectores DB25</li></ul>	2	\$28.00	\$56.00
<ul style="list-style-type: none"><li>Cable de comunicación tipo paralelo</li></ul>	1	\$110.00	\$110.00
<b>OTROS COMPONENTES ELECTRÓNICOS</b>	--	--	\$500.00
<b>TOTAL:</b>			<b>\$5976.70</b>

Por otro lado, la empresa PROBOTIX maneja también la venta de juegos de motores a pasos. Uno de los juegos que atrajo la atención fue el Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver (figura 4.20), el cual incluye:

- Dos motores Green Monster HT23-400-8
- Un motor HT23-280-8
- Tres tarjetas de control, ProboStep VX Uni-Polar Stepper Motor Driver, para motores a pasos unipolares
- Una tarjeta PBX-2 Parallel Port Breakout Board
- Una fuente de alimentación de 6.5A@24V
- 180 cm de Cable DB25 Macho-Macho
- Tres cables planos de 10 pines con longitud de 10 cm



**Figura 4.20. Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver.**

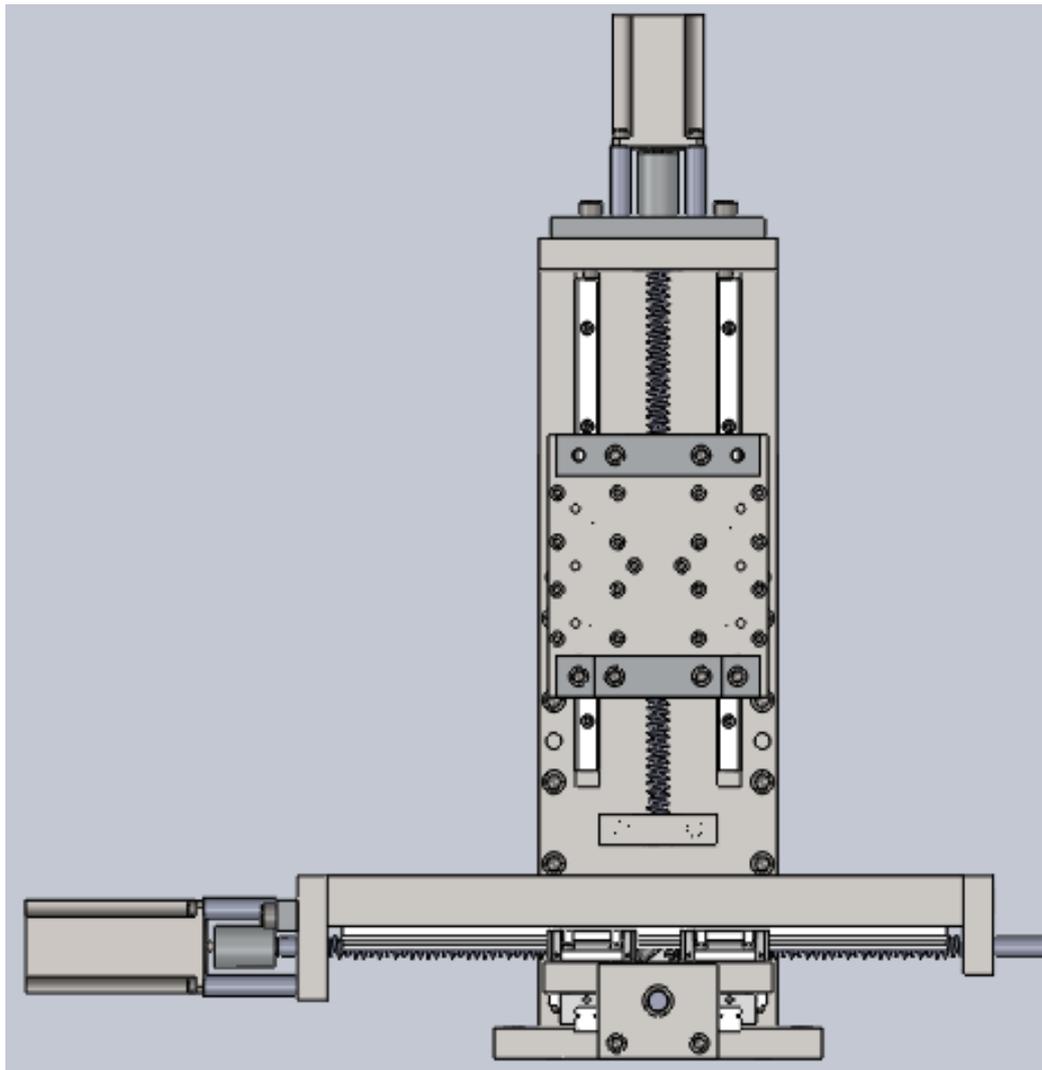
El costo total de este juego se muestra en la tabla 4.2

**Tabla 4.2. Costo Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver.**

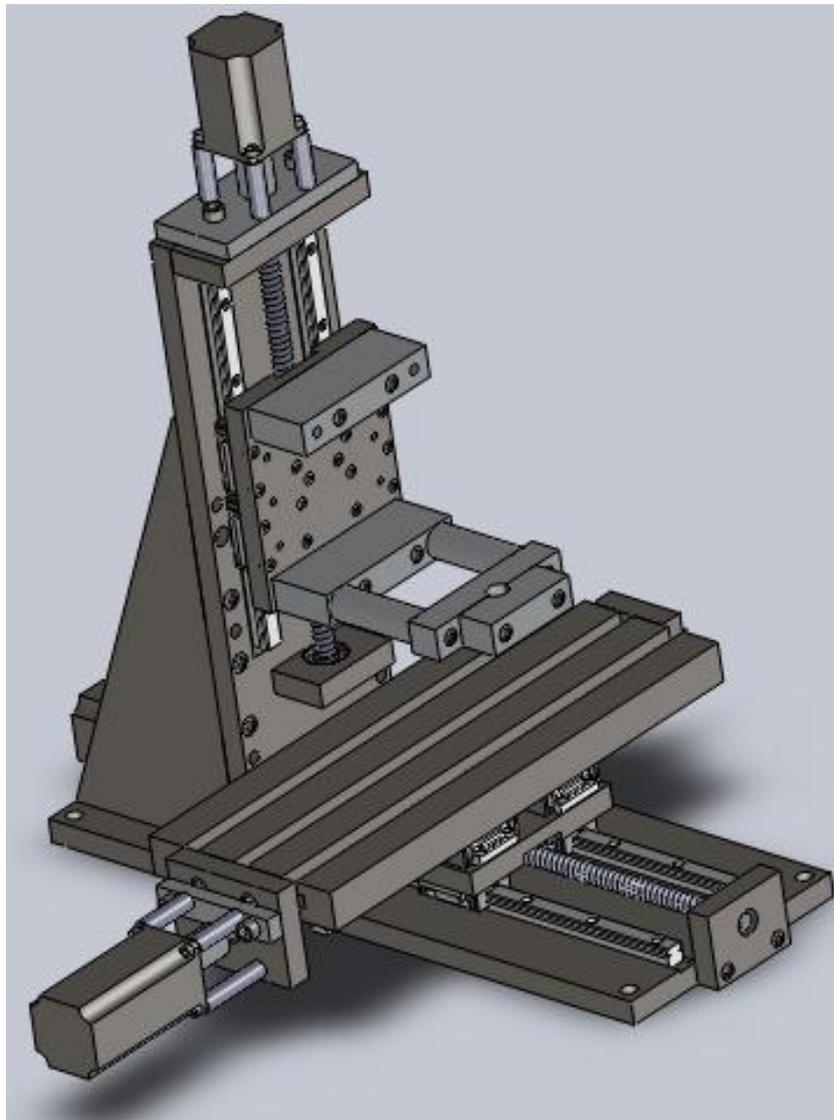
	<b>Precio</b>
Kit 3-Axis Monster Hybrid Stepper Motor Driver	\$5146.00
Gastos de envío	\$1889.44
<b>TOTAL:</b>	<b>\$7035.44</b>

La diferencia del costo del sistema electrónico a construir con respecto al del kit de PROBOTIX es de \$1058.74 y tomando en cuenta el tiempo de elaboración de cada una de las tarjetas del sistema electrónico, se tomó la decisión de comprar el juego de motores a pasos. Las especificaciones se pueden observar en el Apéndice D.

Sabiendo que motores se van a utilizar, el diseño final de la mini fresadora se muestran en las figuras 4.21 y 4.22.



**Figura 4.21. Diseño final, vista frontal.**



**Figura 4.22. Diseño final, vista lateral.**

#### 4.5. Validación del sistema mecánico.

El análisis de resistencia de materiales se realizó empleando el software ANSYS® (ver figura 4.23). Y de él se obtuvieron las deformaciones máximas en los elementos de soporte de la máquina.

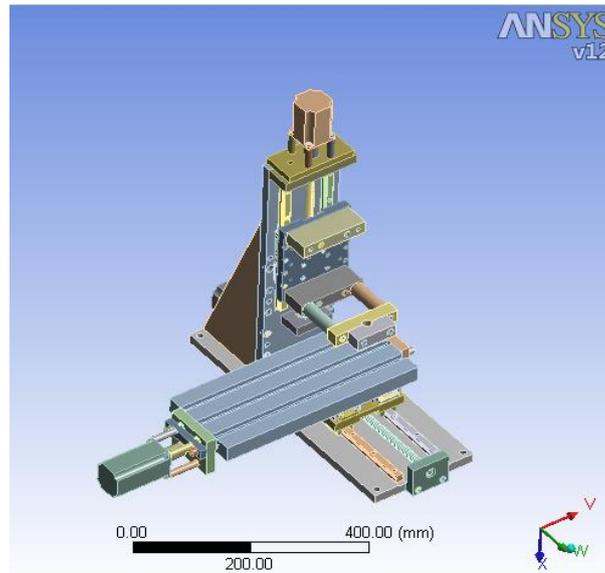


Figura 4.23. Ensamble de Fresadora importado en ANSYS®.

En la evaluación numérica se consideró una carga de 300 N (Newtons), debido al peso de la pieza a maquinar con dimensiones máximas (209 x 152 x 152 mm), como se muestra en la figura 4.24.

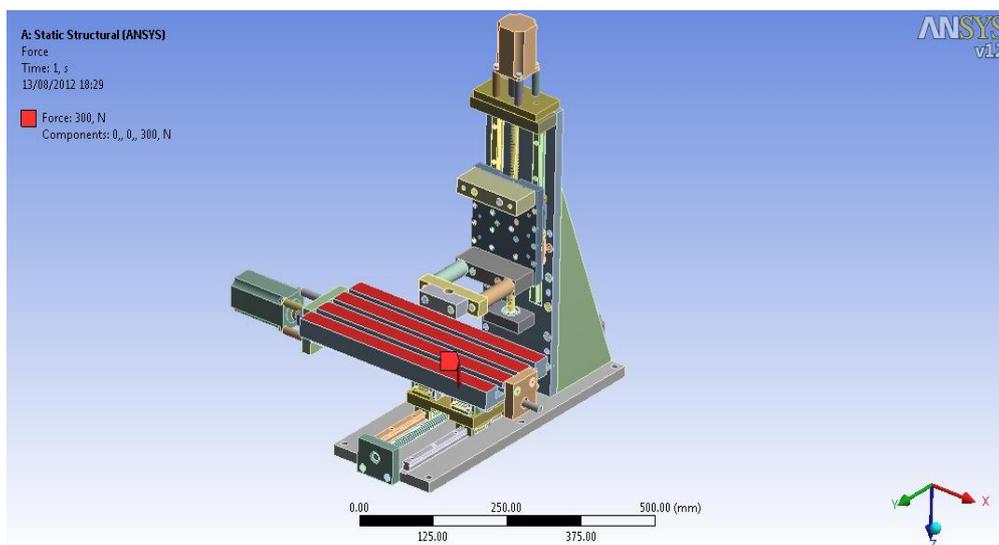
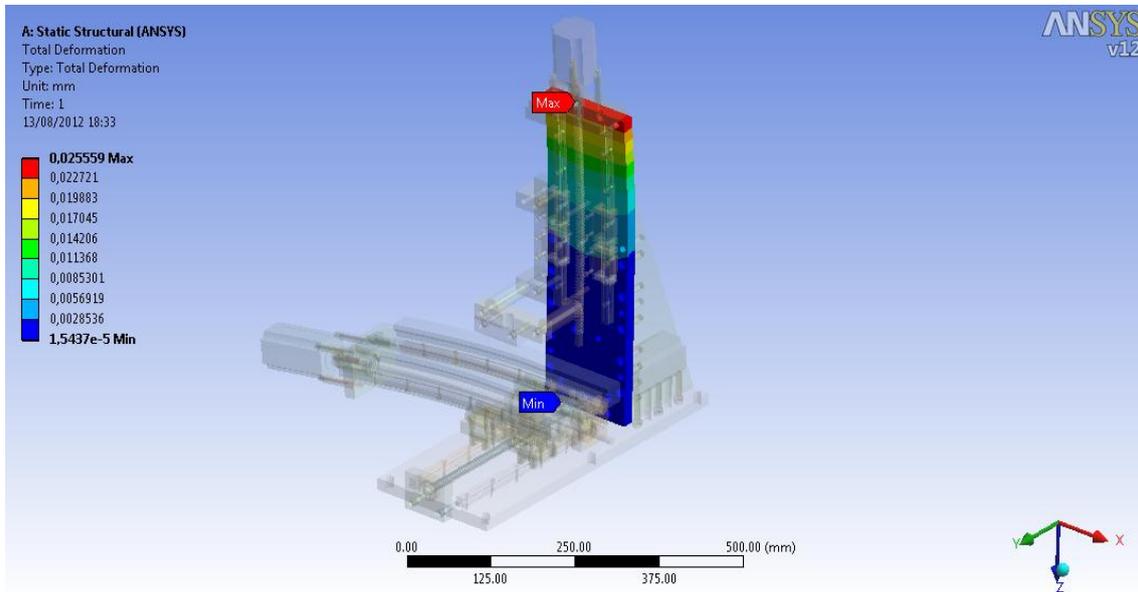


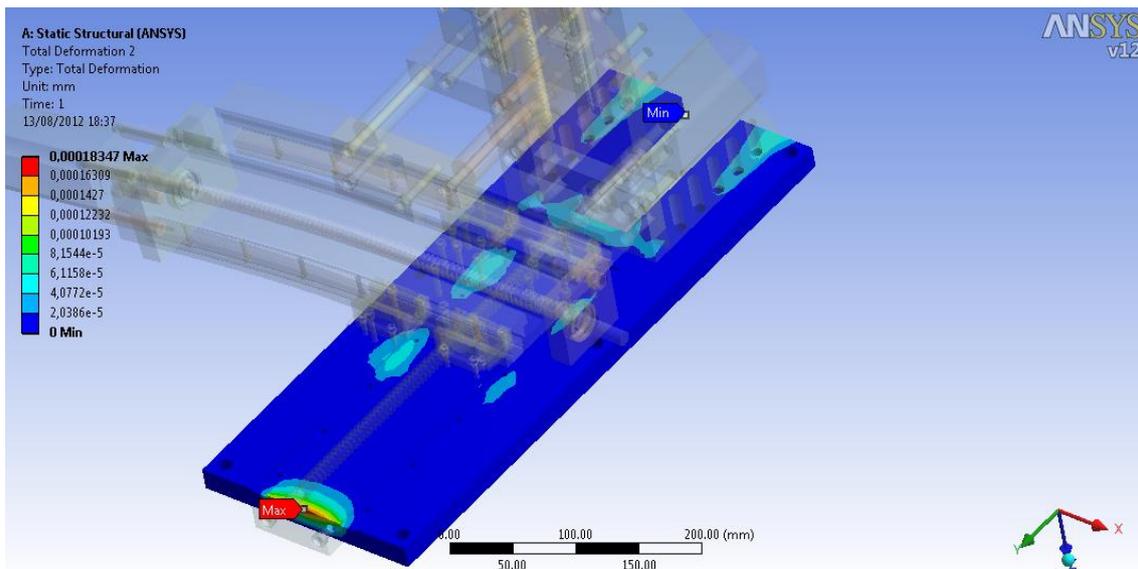
Figura 4.24. Carga aplicada para la evaluación numérica.

El primer elemento de estudio fue la columna del eje Z y de la cual se obtuvo una deformación máxima de 0.025 mm en el extremo superior de la placa como se muestra en la figura 4.25.



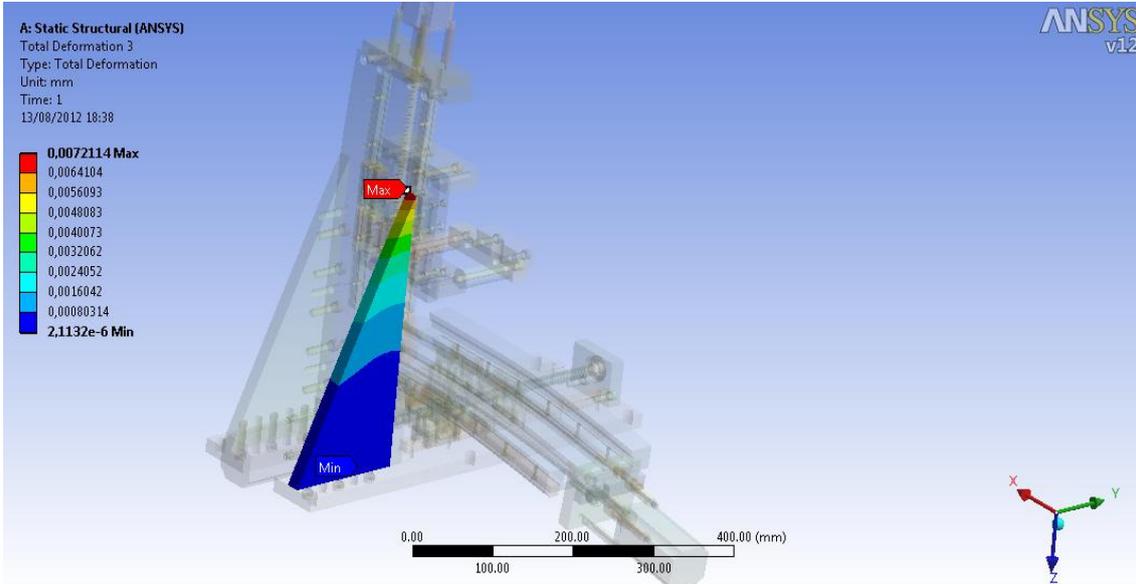
**Figura 4.25. Deformación máxima de la columna.**

El segundo elemento de estudio fue la base de la máquina y el soporte de rodamiento de husillo Y. En los cuales se obtuvo una deformación de  $0.183 \times 10^{-3}$  mm como se muestra en la figura 4.26.

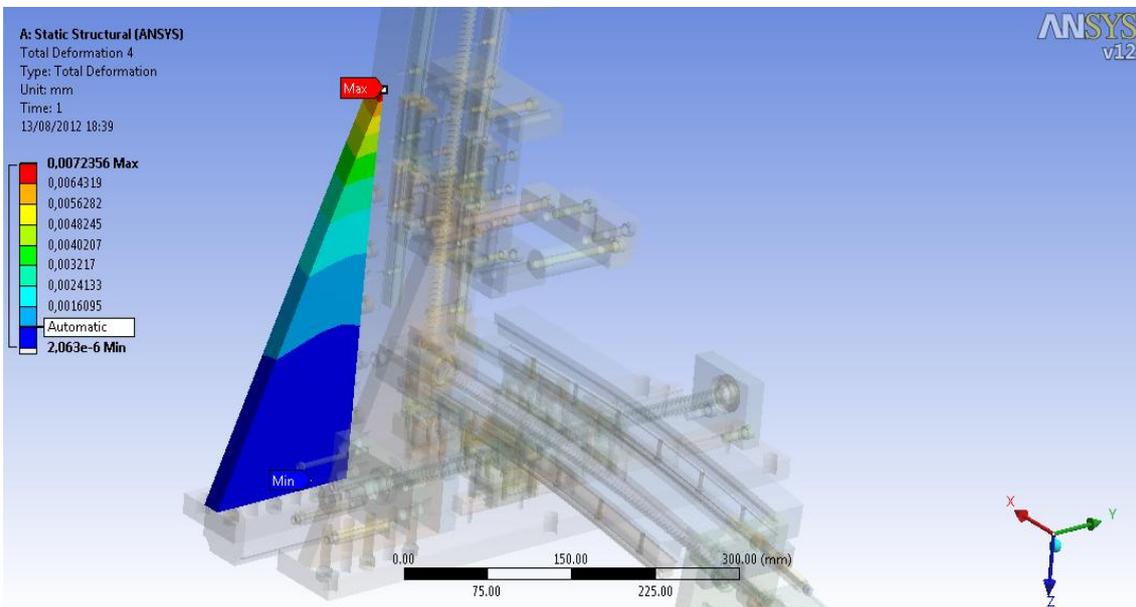


**Figura 4.26. Deformación máxima sobre la base.**

El tercer elemento de estudio corresponde a los cartabones izquierdo y derecho. La deformación máxima obtenida fue de  $7.21 \times 10^{-3}$  mm y  $7.23 \times 10^{-3}$  mm respectivamente, ambos situados en su extremo superior como se observa en las figuras 4.27 y 4.28.



**Figura 4.27. Deformación Máxima de Cartabón izquierdo.**



**Figura 4.28. Deformación Máxima de Cartabón derecho.**

De los resultados obtenidos en el software ANSYS® encontramos que las magnitudes de deformación no afectan de manera significativa a la integridad estructural de los elementos de soporte de la fresadora.

## Capítulo 5

---

### Construcción del prototipo

---

#### 5.1. Construcción del sistema mecánico

##### 5.1.1. Maquinado de piezas

Para realizar el maquinado de la base, la columna, los cartabones, las sillas y los soportes de rodamientos, se compraron placas de Acero A36. La figura 5.1 muestra el estado inicial en que se adquirieron las placas, esto se debe a que este tipo de material presenta alto nivel de oxidación y a que los cortes se realizaron empleando el proceso de oxicorte.



**Figura 5.1. Placas de Acero A36.**

Enseguida se procedió a limpiar las caras de las placas, esto se realizó con la máquina fresadora. La imagen 5.2 muestra la placa para el maquinado de la mesa en ranuras T, después de haberla rectificado burdamente.



**Figura 5.2. Placas de Acero A36 con rectificado burdo.**

Después de haber limpiado las caras, las placas se llevaron a un taller especializado en rectificado de superficies planas, para que dejaran las caras superiores e inferiores totalmente paralelas y les dieran acabado.

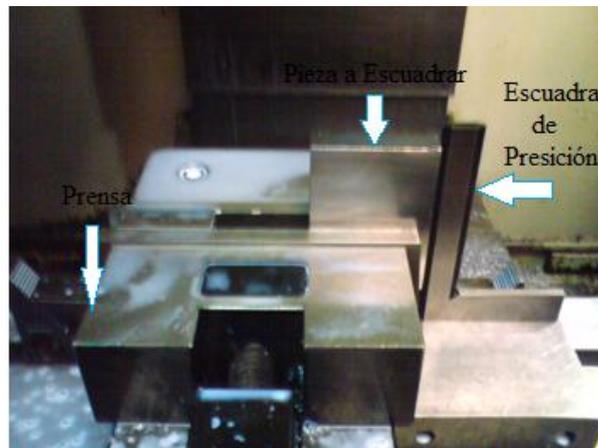
Mientras que las placas para los soportes de rodamiento se rectificaron en la empresa Génesis Industrial, donde se manufacturaron la mayoría de las piezas. En la figura 5.3 se observa la rectificadora de superficies planas utilizada.



**Figura 5.3. Rectificadora de superficies planas para placas pequeñas.**

### **Escuadrado de Laterales de Placas**

Para escuadrar los laterales de las placas se utilizaron escuadras de precisión. Ver figura 5.4.



**Figura 5.4. Escuadrado de laterales.**

### **Maquinado de Base, Columna y Cartabones**

Los barrenos que se sitúan sobre las caras superiores e inferiores, se hicieron en el centro de maquinado de control numérico, CENTROIDE, el cual se encuentra en la empresa Génesis.

Sin embargo, los barrenos que se encuentran sobre las caras laterales se maquinaron en la fresadora.

Para lograr que la fresadora diera la altura de las piezas, se tuvo que sacar el cabezal de la máquina y poner un nuevo soporte que sostuviera la pieza. Ver figura 5.5.



**Figura 5.5. Barrenado de Laterales.**

### **Maquinado de Mesa de Trabajo con ranuras T**

Las ranuras T se maquinaron en una fresadora con una fresa para ranuras T, mejor conocida como cortador Woodruff (ver figura 5.6). En el Anexo E se muestra cómo se seleccionó el cortador. La figura 5.7 muestra fotografías del maquinado de la mesa de trabajo.



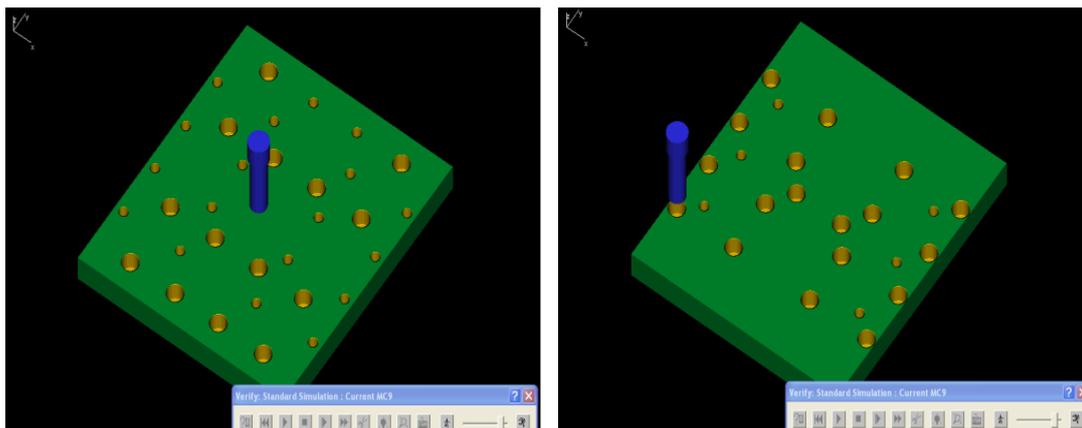
**Figura 5.6. Cortador Woodruff.**



**Figura 5.7. Fotografías de la mesa de trabajo.**

### Maquinado de Sillas

Las ranuras de las sillas se maquinaron en la fresadora y los barrenos en un centro de maquinado de control numérico HAAS. En la figura 5.8 se observa la simulación del código G generado.



**Figura 5.8. Simulación en MasterCAM.**

### Maquinado de Soportes de Rodamiento

Los barrenos de las placas y los alojamientos de los rodamientos se hicieron en la fresadora. En la figura 5.9 se observa una fotografía de los soportes.



**Figura 5.9. Soportes para rodamientos.**

### Maquinado de Bridas

Las bridas se maquinaron en acero redondo A36, esto con el fin de maquinar la cuerda en el torno y después darle forma en la fresadora para que la cara superior de la tuerca embalada quede perpendicular a la cara superior de la brida. En las siguientes figuras se ilustra el maquinado de la brida.



a) Maquinado de la rosca.



b) Rosca 15/16''-16NS.

**Figura 5.10. Rosca para brida.**

Para evitar que se movieran la tuerca de bolas cuando se le dio forma a la brida, se pegaron con adhesivo estos elementos. En la figura 5.11 se observa la brida y la tuerca.



**Figura 5.11. Brida con tuerca embalada.**

### 5.1.2. Ensamblado de piezas

Lo primero que se ensambló fue la estructura; es decir la base, la columna y los cartabones. Entonces se comenzó uniendo los cartabones a la base (ver figura 5.12.) para después ensamblar la columna.



**Figura 5.12. Unión de cartabones y base.**

Después se ensamblaron los rieles de las guías lineales del eje X y Y, manteniendo la perpendicularidad o escuadra entre ellos, esto se probó con la escuadra de precisión. La figura 5.13 muestra la estructura con los rieles montados.



**a) Vista frontal de la estructura**



**b) Vista posterior**

**Figura 5.13. Estructura con rieles del eje X y Y.**

En la figura 5.14 se observa la implementación de los tornillos embalados.



**Figura 5.14. Implementación de tornillos embalados de los ejes XYZ.**

Antes de seguir ensamblando, se pintaron todas las piezas. Es necesario señalar que primero se les aplicó Prymer para que se pudiera adherir la pintura. Observar la figura 5.15.



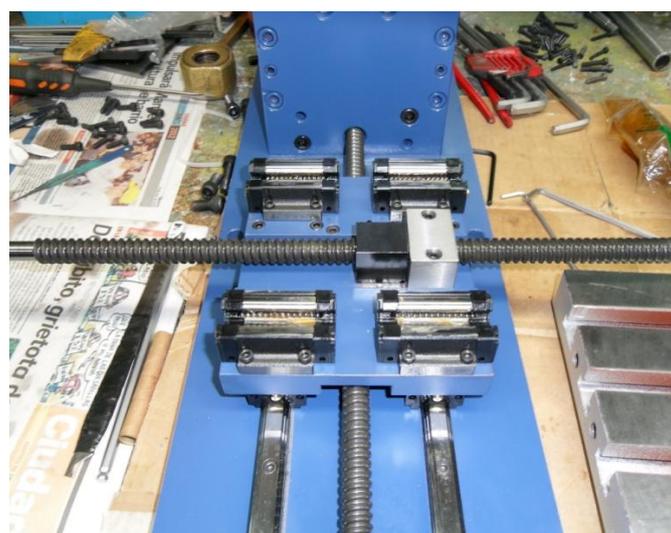
**Figura 5.15. Aplicación de Prymer.**

Después de haber pintado la estructura, se colocaron las guías deslizantes del eje Y para enseguida colocar la silla perteneciente a los ejes XY. La figura 5.16 muestra la estructura pintada con el ensamble de la silla XY y la tuerca de bolas con la brida.



**Figura 5.16. Ensamble de silla XY con brida y tuerca embalada.**

En la figura 5.17 se observa el ensamble de los carros lineales del eje X con la silla.



**Figura 5.17. Ensamble de carros lineales.**

A continuación se muestra el ensamble de la mesa de trabajo, la cual ya tenía sujetos los rieles de las guías. Ver figura 5.18.



**Figura 5.18. Ensamblado de mesa de trabajo.**

Enseguida se ensamblaron las piezas pertenecientes al eje Z. Colocación de los carros sobre los rieles, colocación de la brida y la tuerca sobre la silla Z, acoplamiento del husillo con la tuerca, ensamble de la silla con los carros deslizantes y ensamble de los aumentos para mordaza del taladro porta herramienta.

Por último, se acoplaron los motores a pasos y los sensores mecánicos.

### 5.2. Puesta en marcha del sistema electrónico

Para probar los motores a pasos se tuvieron que conectar a las tarjetas de control y la tarjeta de transmisión de datos, esto se obtuvo siguiendo el diagrama de conexiones del kit de motores mostrado en el Apéndice D.

Una vez que se probó el funcionamiento de los motores, se procedió a armar el gabinete (figura 5.19).



Figura 5.19. Gabinete.

### 5.3. Puesta en marcha del sistema de control

Como se mencionó en el capítulo cuatro, el sistema de control es el controlador Mach3.

A continuación se muestra la configuración del software.

La figura 5.20 muestra el ambiente gráfico de Mach3.

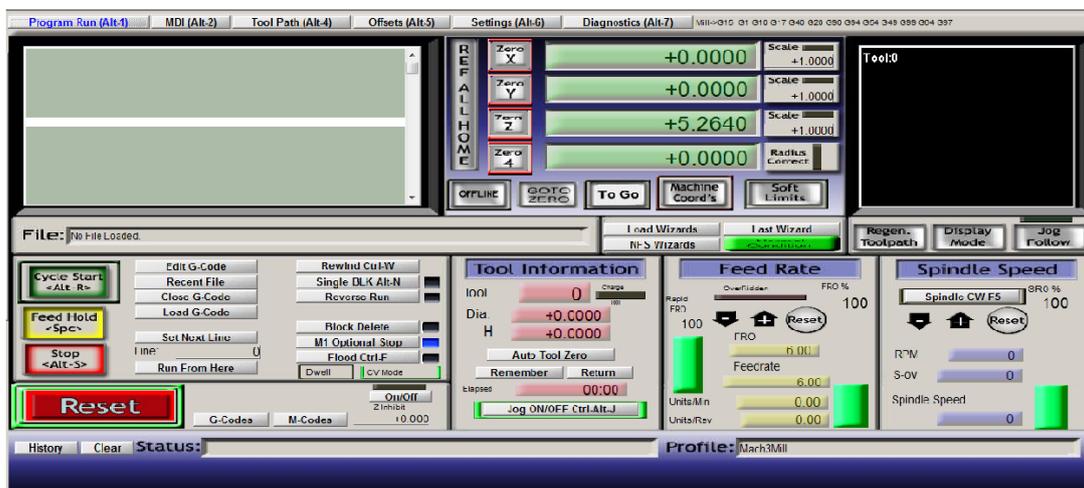
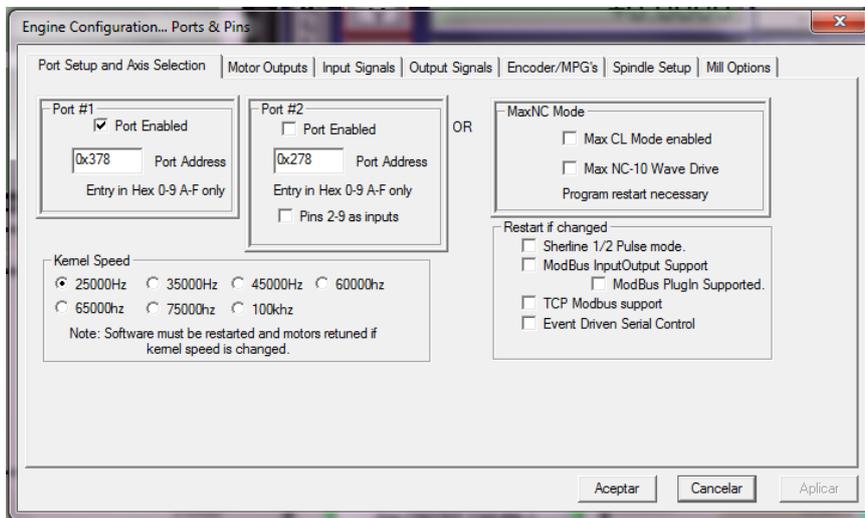


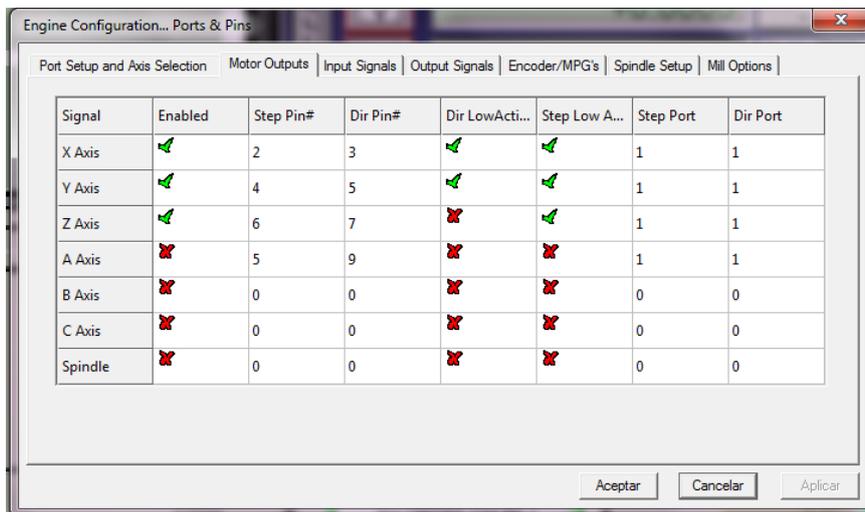
Figura 5.20. Mach3.

Lo primero que se debe configurar es el protocolo de configuración: puerto paralelo. Esta ventana (figura 5.21) se encuentra en Conf >> Ports & Pins >> Port Setup & Axis Selection.



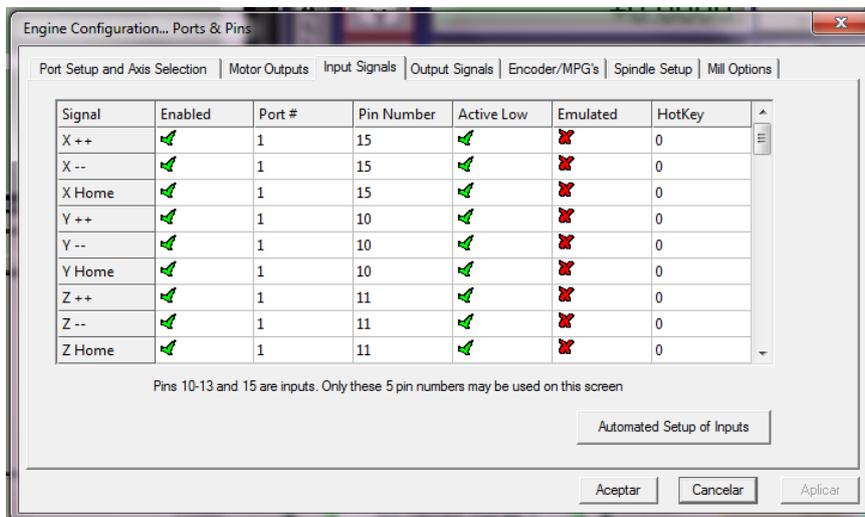
**Figura 5.21. Configuración de puerto paralelo.**

La configuración de los ejes (ver ventana de la figura 5.22) se realiza en Conf >> Ports & Pins >> Motor Outputs. Los pines de paso y dirección están establecidos por los datos del Kit de motores (Ver Apéndice D).



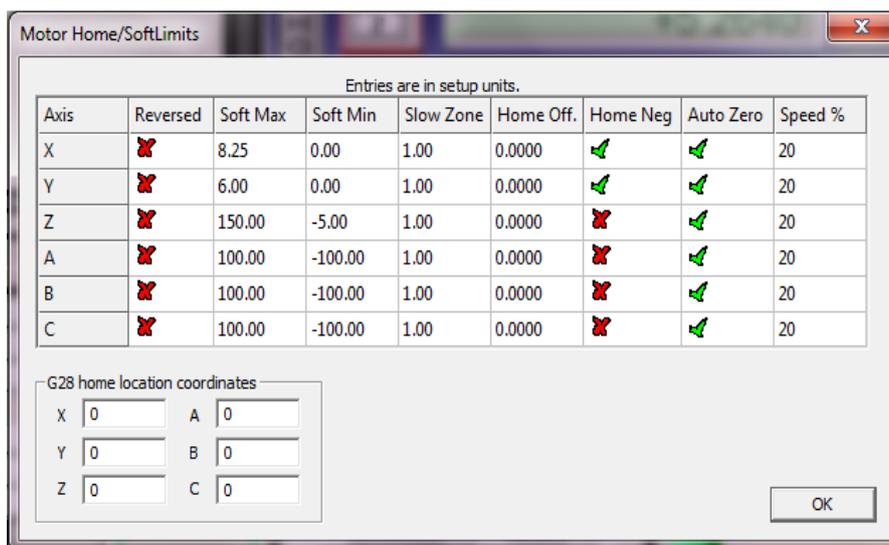
**Figura 5.22. Configuración de ejes.**

La configuración de entradas (ver figura 5.23) que es la habilitación de los límites XYZ, de su posición inicial y el paro de emergencia, se establece en la ventana que se encuentra en Conf >> Ports & Pins >> Input Signals.



**Figura 5.23. Configuración de entradas.**

La configuración del área (figura 5.24) de trabajo se realiza en Conf >> Home/Limits.



**Figura 5.24. Configuración de área de trabajo.**

Por último se configuran los pasos de los motores (figura 5.25) se realiza en Conf >> Motor Tuning. Los pasos por revolución se configuran en el cuadro Step per unit. La velocidad en pulgadas por minuto se establece en el cuadro Velocity.

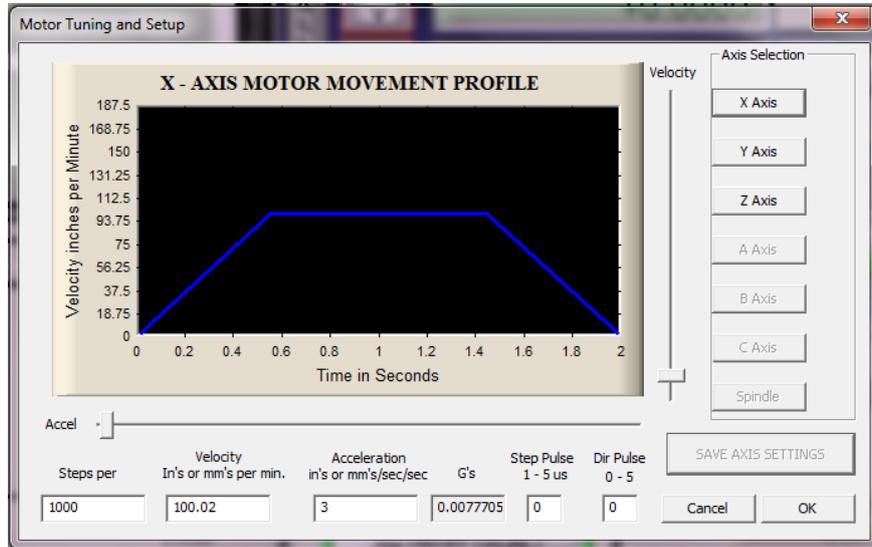


Figura 5.25. Configuración de los parámetros de los motores a pasos.

Una vez terminado el sistema mecánico, electrónico y de control, la mini fresadora CNC de tres ejes se muestra en las siguientes figuras:

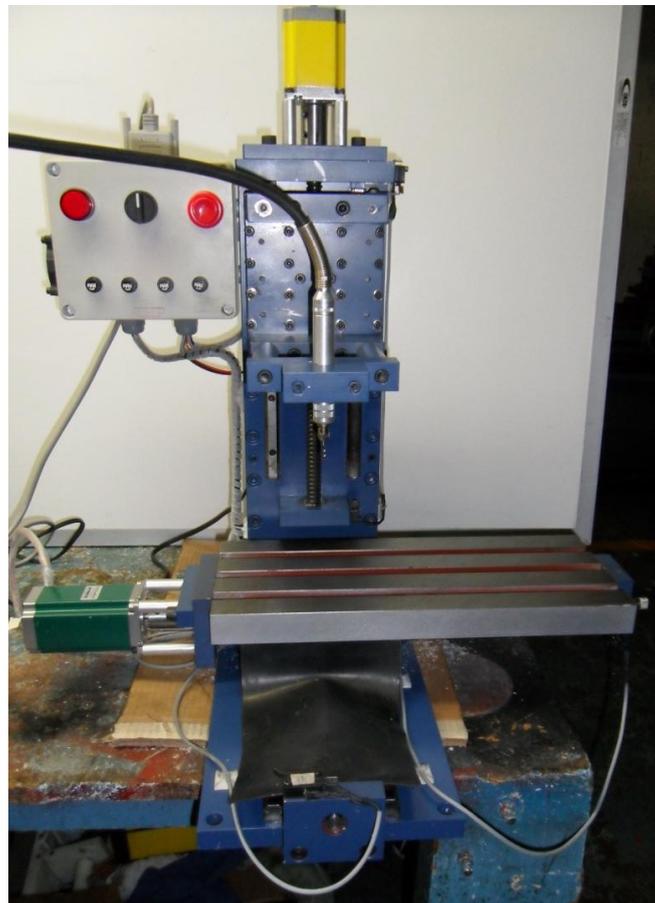
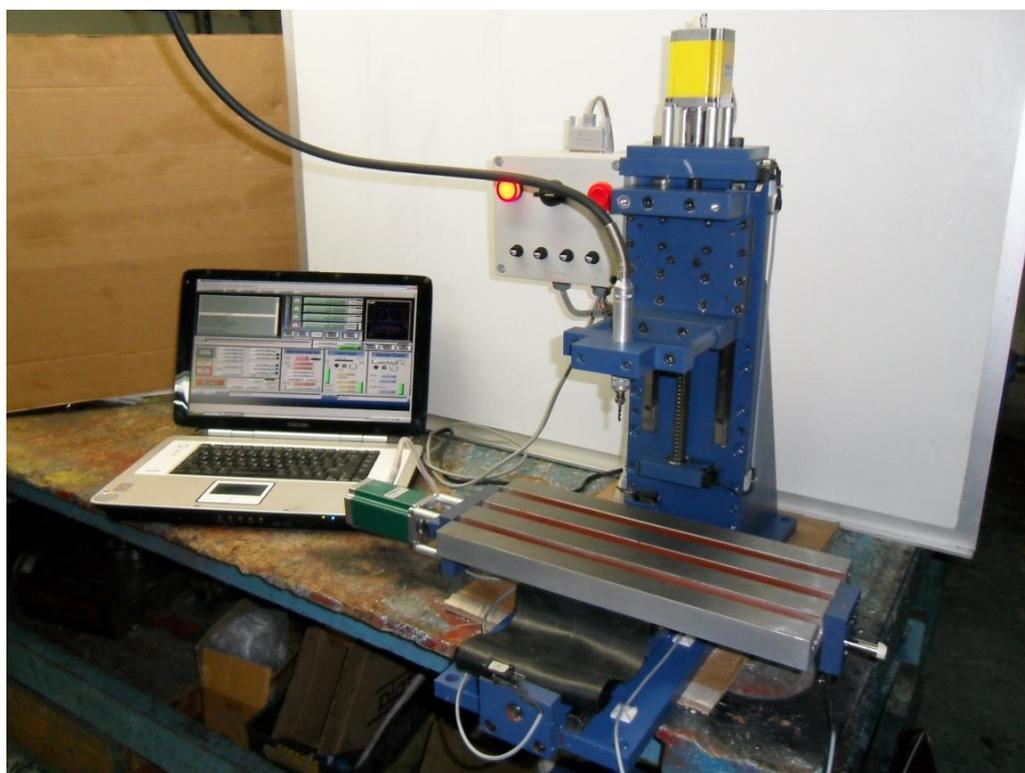


Figura 5.26. Vista frontal de la Máquina Fresadora.



**Figura 5.27. Vista lateral de la Máquina Fresadora.**



**Figura 5.28. Mini Fresadora CNC de Tres Ejes.**



---

## Capítulo 6

---

### Pruebas

---

#### 6.1. Puesta en marcha de la fresadora CNC

Los pasos a seguir para maquinar en la mini fresadora CNC de tres ejes son:

1. **Diseño en CAD** (SOLIDWORKS<sup>®</sup>, AUTOCAD, RHINOCEROS, COREL DRAW, etc.) de la pieza que se requiere maquinar. Las imágenes para estas pruebas se dibujaron en SOLIDWORKS<sup>®</sup>.
2. **Conversión del dibujo a Código G con un software de CAM**<sup>7</sup>. Se pretendía usar LazyCam. Sin embargo, por ser versión de prueba solo permitía convertir el dibujo a código G con funciones de grabado. Por tal motivo, se trabajó con el software BobCad-CAM V24 que la empresa Génesis Industrial facilitó.
3. **Encendido de la máquina fresadora.** Se enciende con el botón selector que se encuentra sobre el gabinete. Una manera de verificar que el sistema se encuentra encendido es el destello del indicador del led señalador.
4. **Cargar código G en Mach3.** Esto se realiza presionando el botón Load G-Code.
5. **Posicionamiento de ejes en origen (home).** Por medio de la interfaz gráfica que ofrece el controlador, se presiona el botón de origen de referencia (Ref All Home) para mandar los ejes XYZ a su origen configurado.

---

<sup>7</sup> Manufactura asistida por computadora.

6. **Ubicar el cero pieza.** El cero pieza es el punto de origen de la pieza que se fija para la programación de las medidas de la pieza, puede ser elegido libremente por el programador. Ya que se tiene ubicado el cero pieza, se presionan los botones X cero, Y cero para guardar los datos en la memoria de Mach3.
7. **Ubicar la altura de la herramienta de corte.** Esto se realiza para evitar rayar el material de la pieza a maquinar y para protección de la misma herramienta. Una vez ubicada la altura se presiona el botón Z cero para guardar el valor.
8. **Dar inicio al proceso de maquinado.** Presionando el botón CycleStart.

## 6.2. Pruebas con plumón

Las primeras pruebas se realizaron con un plumón que sustituyó al taladro, esto para evitar que la herramienta de corte se rompiera en caso de que el desplazamiento de los ejes no fuera constante.

### Prueba 1:

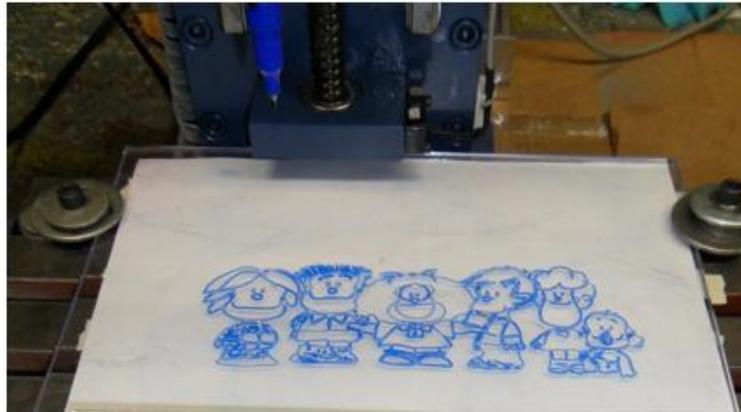
Dibujo animado “La mole”. La figura 6.1 muestra el dibujo obtenido.



**Figura 6.1. Maquinado del rostro del personaje “La Mole”.**

**Prueba 2:**

Dibujo animado “Personajes de Mafalda”. En la figura 6.2 se observa el dibujo obtenido.



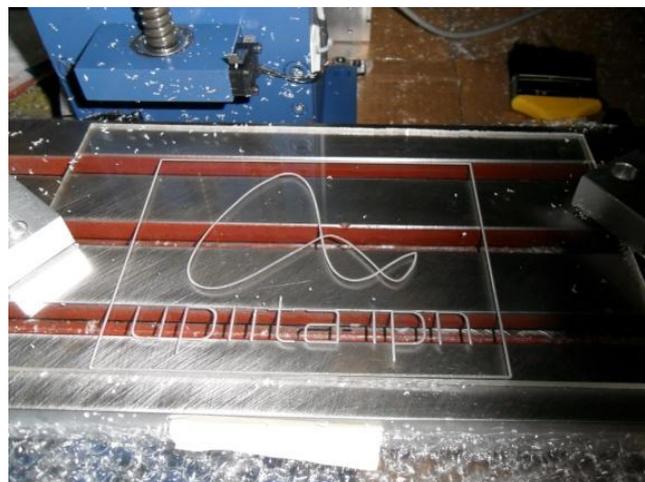
**Figura 6.2. Personajes de Mafalda.**

**6.3. Pruebas con cortador**

Después de haber comprobado que no había errores en el funcionamiento, se montó el taladro con la herramienta de trabajo para grabado, para realizar las pruebas siguientes:

**Prueba 3:**

Logotipo de UPIITA, grabado en acrílico.



**Figura 6.3. Logo de UPIITA.**

**Prueba 4:**

Escudo del IPN, grabado en acrílico.



**Figura 6.4. Escudo del IPN.**

**Prueba 5:**

Maquinado de un octágono de 1 pulgada de distancia entre caras, hecho en nylamid.



**Figura 6.5. Octágono.**

Al medir con el vernier esta pieza obtenemos una medida de 0.9965 pulgadas entre caras; entonces se tiene un error de maquinado de 0.0035 pulgadas.



---

## Capítulo 7

---

### Conclusiones

---

#### Conclusiones

De los datos obtenidos en las pruebas se concluye que la máquina funciona correctamente ya que presenta un error de -0.0035 pulgadas o -0.08mm, los ejes X, Y, Z se mueven perfectamente, los motores no se forzan al maquinar y deja un buen acabado a las piezas finales. Sin embargo, esto se logró con un controlador y un CAM originales (Mach3/Bob-V24), los cuales fueron prestados por la empresa GÉNESIS INDUSTRIAL, ya que se tuvo problemas con las versiones de pruebas porque limitan a cierto número de líneas de código o a ciertas operaciones.

Los objetivos que no cumple este trabajo es la construcción del cabezal de la mini fresadora ya que no se tuvieron los medios económicos para comprar los componentes que el diseño requería, como los rodamientos de precisión y el motor de corriente directa. En sustitución al cabezal se utilizó un taladro para montar la herramienta de corte, el cual no permite maquinar piezas ferrosas. Sin embargo, la mini fresadora está diseñada para maquinar piezas hasta de acero 1018.

Por último, el costo de los elementos de la mini fresadora CNC fue \$ 30,035.36 M.N. El desglose de los elementos se muestra en el Apéndice F.

#### Trabajos a futuro

- Compra de un controlador y un CAM original
- Construcción de un cabezal
- Construcción de un intercambiador de herramienta



---

## Referencias

---

- [1] Krar/Check. *Tecnología de las Máquinas Herramientas*. México: Alfaomega, 2004.
- [2] Fresadora CNC SHERLINE, [Web en línea].  
<http://www.sherline.com/>  
[Consulta: 01-02-2011]
- [3] SpectralLIGHT0200, [Web en línea].  
[http:// www.intelitek.com/ProductDetails.asp?Product\\_ID=2&CategoryID=10  
&Industrial=&Education=yes&category\\_str\\_id=](http://www.intelitek.com/ProductDetails.asp?Product_ID=2&CategoryID=10&Industrial=&Education=yes&category_str_id=)  
[Consulta: 01-02-2011]
- [4] Cristian García Pérez. *Máquina Fresadora de CNC*. Trabajo Terminal II UPIITA, I.P.N. 2003.
- [5] Cortés, Maldonado, Zamora. *Diseño y construcción de mini fresadora de control numérico computarizado (CNC)*. Trabajo Terminal II UPIITA, I.P.N. 2009.
- [6] BARMEX, [Web en línea].  
<[www.barmex.com.mx/](http://www.barmex.com.mx/)>  
[Consulta: 08-03-2011]
- [7] Catálogo en línea FAG, [Web en línea].  
<[www.baleromex.com/catalogos/C-FAG.pdf](http://www.baleromex.com/catalogos/C-FAG.pdf)>  
[Consulta: 11-03-2011]
- [8] PROBOTIX, [Web en línea].  
< <https://probotix.com/>>  
[Consulta: 10-04-2011]



- [9] CAD de guías lineales, [Web en línea].  
<[www.nskamericas.com/](http://www.nskamericas.com/)>  
[Consulta: 5-04-2011]
- [10] ArtSoft USA, [Web en línea].  
<<http://www.machsupport.com/>>  
[Consulta: 20-04-2012]
- [11] Tienda electrónica AG, [Web en línea].  
<<http://www.agelectronica.com/inicio.htm>>  
[Consulta: 12-01-2012]
- [12] Límites de Carrera, [Web en línea].  
<<http://www.esteca55.com.ar/tuto-home&limit.html>>  
[Consulta: 12-01-2012]
- [13] A. L. Casillas. *Máquinas, Cálculos de Taller*. Madrid: Autor-Editor, 2008.
- [14] Edward G. Hoffman. *Manual del Taller para estudiantes y operarios, versión abreviada del Machinery's Handbook*. México: Limusa, 2010.



## APÉNDICE A

# HOJA DE ESPECIFICACIONES DE ELEMENTOS MECÁNICOS

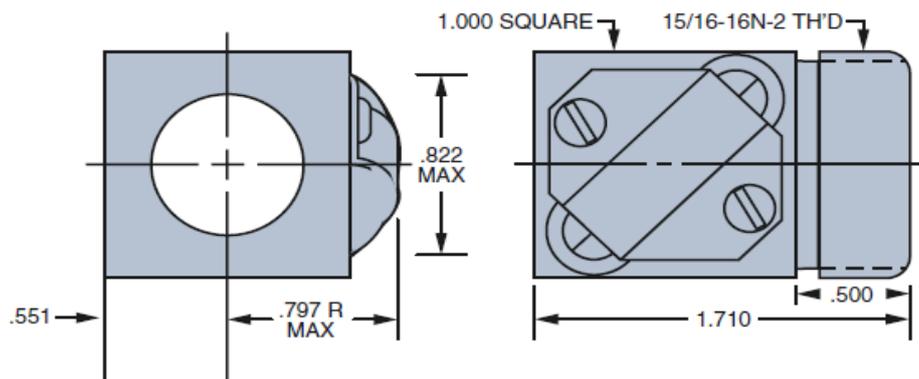
**HUSILLO DE BOLAS**

**Precision Inch Product Specification Summary**

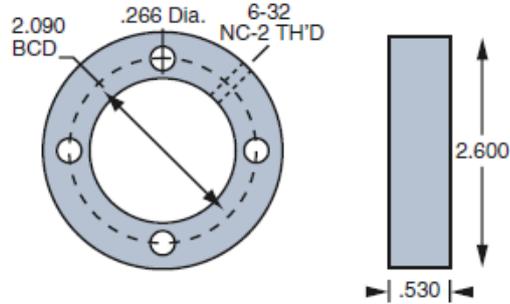
Ball Circle	Lead (in.)	Direction	Screw Part Number	A Root Diameter (in.)	B Maximum Lengths Available (ft.)	Weight (lb./in.)	Use With These Ball Nuts	Use with these Mounting Blocks
.631	.200	RH	5707540 <sup>v</sup>	.480	6	.069	7820827 <sup>v</sup> , 7820955, 7823584, 7832206	7824154
	.200	LH	5707541 <sup>v</sup>	.480	6	.069	7820828 <sup>v</sup>	7824154
	.200 <sup>i</sup>	RH	5705378	.480	6	.069	5707645	7824154
	1.000	RH	7826712	.480	6	.069	7826713, 7827531	7824154

**Precision – Inch**

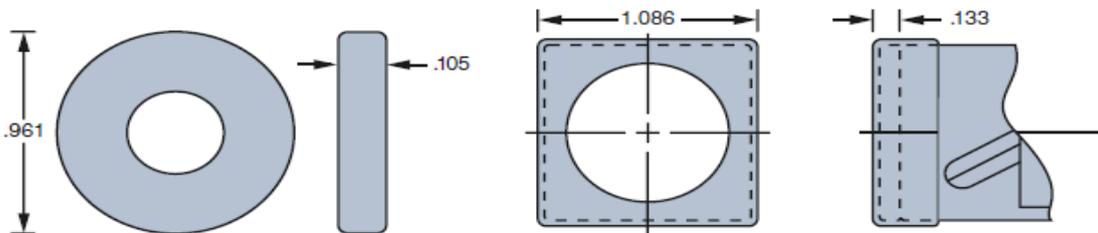
**NON-PRELOADED BALL NUT (SBN™)**



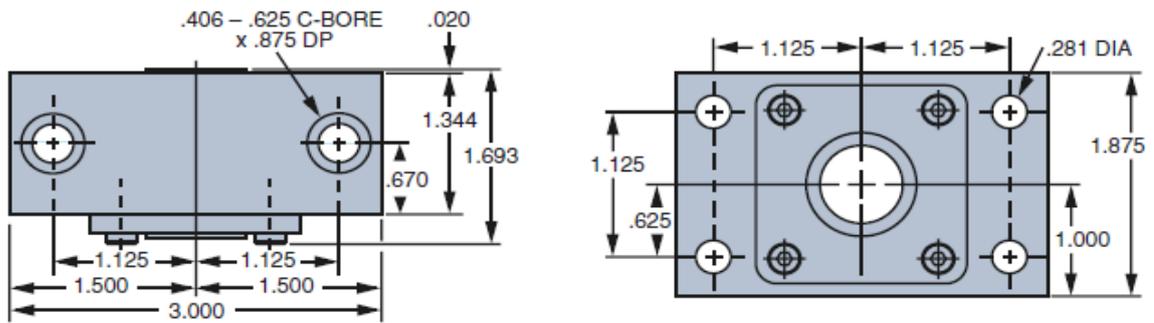
**FLANGE**



**WIPER KIT**



**END BLOCK**



Ball Circle Diameter (size)	Lead (in.)	General Description	Ball Nut Part Number	Ball Screw Part Number	Dynamic Load (lb <sub>f</sub> ) 10° in.	Max Static Load (lb <sub>f</sub> )	Ball Nut Weight (lb)	Flange Part Number	Wiper Kit Part Number	End Block Part Number
.631	.200	RH, NP <sup>a</sup>	7820827	5707540	778	6,384	.270	5707570	5702647	7824154
		LH, NP <sup>a</sup>	7820828	5707541	778	6,384	.270	5707570	5702647	7824154
		RH, SS, NP	5707645	5705378	140	1,149	.270	Consult factory	5702647	7824154

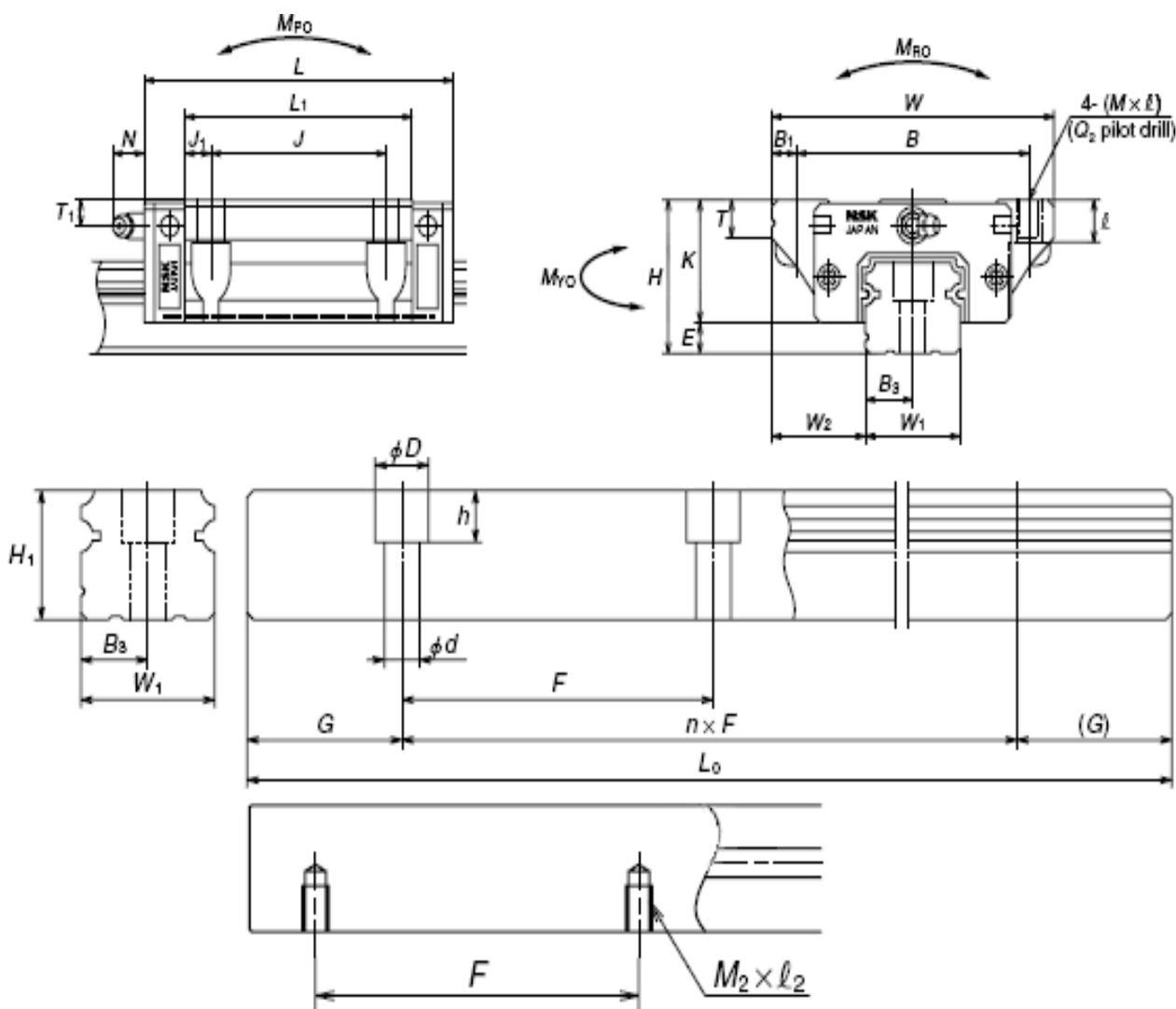
**Guía Lineal para el eje X**

LH Series – EM and GM Sliders with- or without NSK K1 lubrication unit

EM/GM sliders with light- (Z) or medium (H) preload are standard stock items with prompt delivery

EM: Normal length, low height flange slider with tap/trough holes

GM: Long length, low height flange slider with tap/trough holes



Model-No.  
LH150380EMC2PCZ

Type  
Linear Guide LH Series



Size	15
Slider type	EM
Number of sliders	2
Lubrication unit K1	No
Double seal	No
Metal protector	No
Material / Surface treatment	C
Length of rail	380
Distance to first hole center (G1)	40
Distance to last hole center (G2)	40
Accuracy	PC
Preload	Z
H	24
E	4.6
W2	16

W	47
B	38
J	30
L	55
L1	39
J1	4.5
K	19.4
T	8
O x l	4.4 x 7
M x l	M5 x 7
Grease fitting	Ø3 mm
T1	4.6
N	4
Dynamic C (N)	10800
Static C0 (N)	20700
MRO (Nm)	108
MPO (Nm)	95
MYO (Nm)	80
Weight slider (kg)	0.17
W1	15
H1	15
F	60
dxDxh	4.7x7.5x5.3
M2xl2	M5 x 8
B3	7.5
G (recommended)	20
Weight rail (kg/m)	1.6

**Guía Lineal para el eje Y**



Model-No.  
LH150330EMC2PCZ

Type  
Linear Guide LH Series

Size	15
Slider type	EM
Number of sliders	2
Lubrication unit K1	No
Double seal	No
Metal protector	No
Material / Surface treatment	C
Length of rail	330
Distance to first hole center (G1)	15
Distance to last hole center (G2)	15
Accuracy	PC
Preload	Z
H	24
E	4.6
W2	16

W	47
B	38
J	30
L	55
L1	39
J1	4.5
K	19.4
T	8
O x l	4.4 x 7
M x l	M5 x 7
Grease fitting	Ø3 mm
T1	4.6
N	4
Dynamic C (N)	10800
Static C0 (N)	20700
MRO (Nm)	108
MPO (Nm)	95
MYO (Nm)	80
Weight slider (kg)	0.17
W1	15
H1	15
F	60
dxDxh	4.7x7.5x5.3
M2xl2	M5 x 8
B3	7.5
G (recommended)	20
Weight rail (kg/m)	1.6

**Guía Lineal para el eje Z**



Model-No.  
LH150300EMC2PCZ

Type  
Linear Guide LH Series

Size	15
Slider type	EM
Number of sliders	2
Lubrication unit K1	No
Double seal	No
Metal protector	No
Material / Surface treatment	C
Length of rail	300
Distance to first hole center (G1)	30
Distance to last hole center (G2)	30
Accuracy	PC
Preload	Z
H	24
E	4.6
W2	16

W	47
B	38
J	30
L	55
L1	39
J1	4.5
K	19.4
T	8
O x l	4.4 x 7
M x l	M5 x 7
Grease fitting	Ø3 mm
T1	4.6
N	4
Dynamic C (N)	10800
Static C0 (N)	20700
MRO (Nm)	108
MPO (Nm)	95
MYO (Nm)	80
Weight slider (kg)	0.17
W1	15
H1	15
F	60
dxDxh	4.7x7.5x5.3
M2xl2	M5 x 8
B3	7.5
G (recommended)	20
Weight rail (kg/m)	1.6



## **Rodamientos**

Para la selección de elementos donde se apoye un eje giratorio, se tienen dos opciones: rodamientos y bujes. Para el diseño y construcción de este prototipo se emplearon rodamientos pues su ciclo de vida y rendimiento es mayor al comparado con los bujes.

Se seleccionaron los rodamientos rígidos de bolas debido a que soportan cargas radiales moderadas así como cargas radiales pequeñas, son capaces de operar en altas velocidades y requieren poca atención o mantenimiento en servicio; mientras que los rodamientos de rodillos cilíndricos son usados en aplicaciones de ingeniería pesada, donde las cargas radiales que soportan son muy elevadas y oscilantes.





## APÉNDICE B

# PLANOS DE FABRICACIÓN



## APÉNDICE C

# MEMORIA DE CÁLCULO

### CÁLCULO DE PAR PARA MOTORES A PASOS

Una rosca de tornillo es un plano inclinado, como se muestra en la figura 1.

$f$  = Fuerza de fricción

$N$  = Fuerza Normal

$F$  = Fuerza necesaria para desplazar la tuerca

$P$  = Carga que debe desplazar la tuerca

$\lambda$  = Ángulo de desplazamiento

$\theta$  = Ángulo de paso

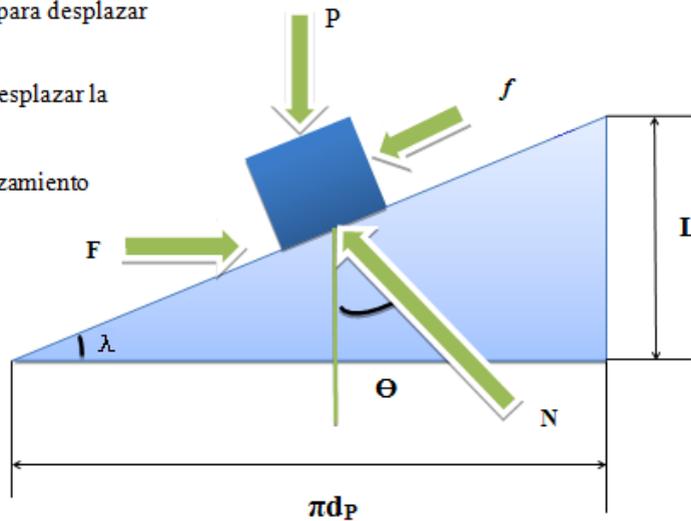


Figura 1. Diagrama simplificado del husillo.

El diagrama de cuerpo libre se ilustra en la siguiente figura.

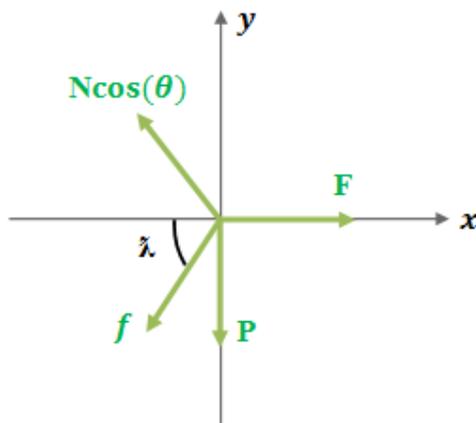


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre.



Suma de fuerzas en  $x$ :

$$\sum F_x = F - \mu N \cos(\lambda) - N \cos(\theta) \sin(\lambda) = 0$$

Donde:

$$N = \frac{F}{\mu \cos(\lambda) + \cos(\theta) \sin(\lambda)} \quad (1)$$

Suma de Fuerzas en  $y$ :

$$\sum F_y = -P - \mu N \sin(\lambda) + N \cos(\theta) \cos(\lambda) = 0$$

Donde:

$$N = \frac{P}{-\mu \sin(\lambda) + \cos(\theta) \cos(\lambda)} \quad (2)$$

Igualando (1) y (2) y despejando la fuerza necesaria para mover los motores se tiene:

$$F = \frac{P [\mu \cos(\lambda) + \cos(\theta) \sin(\lambda)]}{-\mu \sin(\lambda) + \cos(\theta) \cos(\lambda)}$$

Sabiendo que:

$$\tan \lambda = \frac{\sin(\lambda)}{\cos(\lambda)}$$

Entonces:

$$F = \frac{P [\mu + \tan(\lambda) \cos(\theta)]}{-\mu \tan(\lambda) + \cos(\theta)} \quad (3)$$

Multiplicando (3) por el radio de paso del tornillo de bolas se obtiene:

$$\tau = \frac{PD_p}{2} \left\{ \frac{[\mu + \tan(\lambda) \cos(\theta)]}{-\mu \tan(\lambda) + \cos(\theta)} \right\} \quad (4)$$

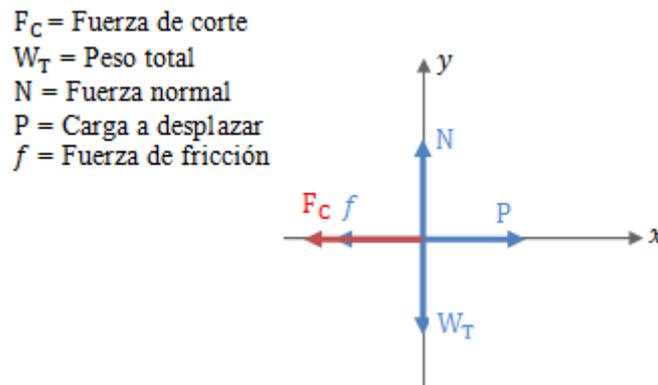
Donde:

T = Par requerido para mover la carga P

D<sub>p</sub> = Diámetro de paso

Ahora se requiere calcular la carga total máxima que desplazará el husillo. Para ello se considerará el valor de la fuerza cortante máxima en la herramienta de corte ya que provoca la misma magnitud en sentido contrario al corte.

Entonces se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre:



**Figura 3. Diagrama de cuerpo libre.**

Suma de fuerzas en x:

$$\sum F_x = P - F_C - \mu N = 0$$

$$\therefore P = F_C + \mu N \tag{5}$$

Suma de fuerzas en y:

$$\sum F_y = N - W_T = 0$$

$$\therefore N = W_T \tag{6}$$

Sustituyendo (6) en (5):

$$P = F_C + \mu W_T \tag{7}$$



La fuerza de corte ( $F_C$ ) se puede calcular de la forma siguiente:

$$F_C = \frac{K_s * h_m * a_A}{\sin(\alpha)} \quad (8)$$

Donde:

$K_s$  = Fuerza específica de corte en  $[N/mm^2]$

$\alpha$  = Ángulo de desprendimiento de viruta

$a_A$  = Profundidad de corte

$h_m$  = Espesor medio de viruta

$$h_m = S_z \sqrt{\frac{a_R}{D}} \quad (9)$$

$S_z$  = Avance por filo  $[mm/filo]$

$a_R$  = Ancho de corte

D = Diámetro de herramienta

### Sustitución de Datos

En el presente trabajo terminal se emplearan cortadores verticales de 1/2 in de 4 gavilanes con zanco de 1/2 in, como máximo, por lo que el diámetro de la herramienta (D) es de 12.7 mm.

El máximo material a maquinar es el Acero 1018. Las propiedades de este material son las siguientes:

- Acero Grado maquinaria
- Dureza: 126HB (54-56 RC)
- Resistencia mecánica: 36-56 kg/mm<sup>2</sup>
- Composición química
  - Carbono (C): 0.15-0.20%
  - Silicio (Si): 0.15-0.35%
  - Manganeso (Mn): 0.60-0.90%

El avance por filo  $S_z$  se seleccionó de la siguiente tabla, extraída del libro Cálculos de Taller, Pg.596 [13]:

**Tabla 1: Avances para cortadores de acero rápido (HSS).**

Avances para trabajar diversos materiales en las máquinas fresadoras. Valores medidos utilizando herramientas de acero rápido.				
Tipos de Fresa		Fresas cilíndricas	Cortador vertical	Fresas de disco
Material a Fresar		Avances en milímetros por filo o diente		
<b>A C E R O S</b>	40-50 kg/mm <sup>2</sup>	0.075	0.2	0.10
	50-60 kg/mm <sup>2</sup>	0.06	0.2	0.09
	60-85 kg/mm <sup>2</sup>	0.045	0.15	0.08
	85-110 kg/mm <sup>2</sup>	0.037	0.15	0.07
	110-140 kg/mm <sup>2</sup>	0.026	0.10	0.06
	140-180 kg/mm <sup>2</sup>	0.02	0.07	0.05
<b>ACERO MOLDEADO</b>	38 kg/mm <sup>2</sup>	0.075	0.2	0.09
	45 kg/mm <sup>2</sup>	0.06	0.15	0.08
	52 kg/mm <sup>2</sup>	0.05	0.15	0.08

**NOTA:** Los avances indicados en las tablas, para fresado en terminación con PASADA ÚNICA. Para desbaste, aumentar el 75%. Para afinado, reducir el 25%.

Así:

$$S_z = 0.35 \text{ mm/filo}$$

El ancho de corte está dado por:

$$a_R = \frac{1}{2} D$$

$$a_R = 6.35 \text{ mm}$$

Sustituyendo en (9):

$$h_m = 0.35 \sqrt{\frac{6.35}{12.7}}$$

$$h_m = 0.247 \text{ mm}$$

De las tabla siguiente se tiene que  $K_s = 245 \text{ kp/mm}^2$

**Tabla 2: Valores de fuerza específica de corte para diversos materiales.**

Material		Dureza	$K_s$	
			$\text{kp/mm}^2$	$\text{lb/pulgada}^2$
Acero al carbono no aleado normalizado	C 0.15%	125	245	348390
	C 0.35%	120	270	383940
	C 0.70%	250	295	419490
Acero poco aleado	Recocido	125-200	285	405270
	Endurecido	200-450	350	497700
Acero altamente aleado	Recocido	150-250	315	447930
	Endurecido	250-500	365	519030
Acero inoxidable	Ferr. Mart	175-225	325	462150
	Aust.	150-200	350	497700
Acero fundido (inoxidable)	No aleado	225	230	327060
	Poco aleado	150-250	250	355500
	Altamente aleado	150-300	285	405270
Acero al manganeso		>50HRC	600	853200
Fundición maleable	Viruta corta	110-145	195	277290
	Viruta larga	200-250	180	255960
Fundición gris	Poca resistencia a la tracción	150-225	125	177750
Fundición gris & fundición aleada	Alta resistencia a la tracción	200-300	160	227520
Fundición nodular, hierro SG	Ferrítica	125-200	135	191970
	Perlítica	200-300	200	284400
Fundición endurecida en coquilla		HRC 40-60	425	604350
Aluminio aleado		100	75	106650

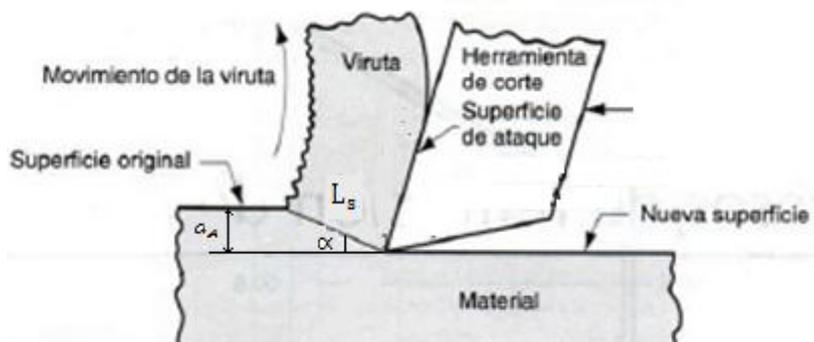
Sabiendo que:

$$1 \text{ kp/mm}^2 = 9.81 \text{ N/mm}^2$$

Entonces:

$$K_s = 2403.45 \text{ N/mm}^2$$

El ángulo de desprendimiento de viruta se obtiene durante el proceso de fresado, el cual se ilustra en la figura 4.



**Figura 4. Geometría para obtener el ángulo de desprendimiento de viruta durante el proceso de fresado.**

Por lo tanto:

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{a_A}{L_s} \cos(\beta)}{1 - \frac{a_A}{L_s} \sin(\beta)} \right\} \tag{10}$$

Donde:

$L_s$  = Valor del ancho de viruta

$\alpha$  = Ángulo de desprendimiento de viruta

$a_A$  = Profundidad de corte

$\beta$  = Ángulo de claro de flanco de la herramienta

Se utiliza un ángulo de claro de flanco  $\beta$  de  $10^\circ$ , que es el más pequeño encontrado en los cortadores y el que genera mayores fuerzas de corte, lo que servirá para calcular las condiciones máximas de la máquina.

La relación  $\frac{a_A}{L_s}$  se propone de  $\frac{1}{4}$ , con la cual se produce una sección de viruta muy grande, permitiendo así plantear condiciones máximas de la máquina.

Sustituyendo los valores en (10), se tiene:

$$\alpha = 14.43^\circ$$



Y proponiendo:

$$a_A = 1 \text{ mm}$$

Se sustituyen valores en (8):

$$F_c = \frac{2403.45 * 0.2475 * 1}{\sin(14.43)}$$

Entonces:

$$F_c = 621.1856 \text{ N}$$

### PAR PARA EL EJE Y

El peso total comprende:

- Silla del eje Y: 2.06647 kg
- 2 Guías lineales del eje Y: 0.27549 kg
- Mesa con ranuras T: 12.58732 kg
- 2 Soportes rodamientos laterales: 1.16984 kg
- Prensa y peso estimado de la pieza : 50 kg

Entonces:

$$W_T = 66.09957 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_T = 648.4367817 \text{ N}$$

El coeficiente de fricción estático ( $\mu$ ) del acero duro es de **0.78**.

La carga a mover está dada por la ecuación (7). Sustituyendo se tiene:

$$P = 621.7865 + 0.78 * 648.4367$$

$$P = 1126.97 \text{ N}$$



Para determinar el Par necesario del motor a pasos del eje Y se tiene la ecuación (4).

**Datos:**

El coeficiente de fricción que existe entre la tuerca y el tornillo de bolas es  $\mu = 0.14$  (Catálogo Tornillo de Bolas Thomson).

El ángulo de desplazamiento ( $\lambda$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi * D_p} \tag{11}$$

Donde:

L = Paso (lead)

$D_p$  = Diámetro de Paso

$$D_p = D_r + R_{bc} \tag{12}$$

Donde:

$D_r$  = Diámetro de raíz del tornillo de bolas

$R_{bc}$  = Radio del balín de la tuerca

De la hoja de datos del fabricante se tiene:

$$D_r = 0.480 \text{ in}$$

$$\text{Diámetro del balín} = 1/8 \text{ in} = 0.125 \text{ in}$$

$$\therefore \text{Radio del balín} = 0.0625 \text{ in}$$

Sustituyendo valores en (12):

$$D_p = 0.480'' + 0.0625'' = 0.5425''$$

$$D_p = 13.78 \text{ mm}$$

De la hoja de datos del fabricante THOMSON se obtiene:

- El paso del tornillo de bolas es de 0.2 in.  
 $L = 0.2 \text{ in} = 5.08 \text{ mm}$
- Ángulo de paso, en los tornillos de bolas este ángulo es menor a  $5^\circ$   
 $\theta = 3^\circ$



Entonces sustituyendo valores en (12), se obtiene:

$$\tan \lambda = \frac{5.08}{13.78 * \pi} = \mathbf{0.11734}$$

Sustituyendo en (4) se tiene:

$$\tau_y = \frac{13.78}{2} * \frac{1126.97(0.14 + 0.11734 * \cos(3))}{-0.14 * 0.11734 + \cos(3)}$$

$$\tau_y = 2038.60 \text{ Nmm} = 2.0386 \text{ Nm}$$

$$\tau_y = \mathbf{2.0386 \text{ Nm} = 288.69 \text{ OzIn}}$$

**PAR PARA EL EJE X:**

$$W_T = 63.76 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_T = 625.46 \text{ N}$$

Sustituyendo valores en (7):

$$P = 1109.04 \text{ N}$$

Sustituyendo valores en (4):

$$\tau_x = \frac{13.78}{2} * \frac{1109.04(0.14 + 0.11734 * \cos(3))}{-0.14 * 0.11734 + \cos(3)}$$

$$\tau_x = 1969.5794 \text{ Nmm} = 1.969 \text{ Nm}$$

$$\tau_x = \mathbf{1.969 \text{ Nm} = 278.83 \text{ OzIn}}$$



**PAR PARA EL EJE Z:**

$$W_T = 24.1548.76 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_T = 236.959 \text{ N}$$

Sustituyendo valores en (7):

$$P = 806.01 \text{ N}$$

Sustituyendo valores en (4):

$$\tau_z = \frac{13.78}{2} * \frac{806.01(0.14 + 0.11734 * \cos(3))}{-0.14 * 0.11734 + \cos(3)}$$

$$\tau_z = 1461.30 \text{ Nmm} = 1.4613 \text{ Nm}$$

$$\tau_z = 1.4613 \text{ Nm} = 206.94 \text{ OzIn}$$



### CÁLCULO DEL PAR Y POTENCIA DE CORTE EN EL FRESADO

Para calcular el par de corte se tiene la siguiente ecuación:

$$M = \frac{K_s * S_z * a_A * a_R * z}{2\pi} \quad (13)$$

Donde:

$M$  = Par de corte [N – mm]

$K_s$  = Fuerza específica de corte en  $[N/mm^2]$

$S_z$  = Avance por filo  $[mm/filo]$

$a_A$  = Profundidad de corte

$a_R$  = Ancho de corte

$z$  = Número de filos de la herramienta

#### Sustitución de datos

Los datos se calcularon anteriormente y son los siguientes:

$$K_s = 2403.45 \text{ N/mm}^2$$

$$S_z = 0.35 \text{ mm/filo}$$

$$a_A = 1 \text{ mm}$$

$$a_R = 6.35 \text{ mm}$$

$$z = 4 \text{ filos o gavilanes}$$

Entonces:

$$M = \frac{2403.45 * 0.35 * 1 * 6.35 * 4}{2\pi}$$

$$M = 3400.6 \text{ Nmm} = 3.4 \text{ Nm}$$



La potencia de corte se calcula de la siguiente forma:

$$P = M * \omega \tag{14}$$

Donde:

$P$  = Potencia de corte [W]

$M$  = Par de corte [Nmm]

$\omega$  = Velocidad angular de la herramienta [rad/seg]

$$\omega = \frac{2\pi * n}{60} \tag{15}$$

$n$  = Velocidad de giro de la herramienta[r. p. m]

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * D} \tag{16}$$

$v$  = velocidad de corte recomendada [m/min]

$D$  = Diámetro de herramienta

**Sustitución de datos**

La velocidad de corte recomendada  $n$  se seleccionó de la siguiente tabla, extraída del Manual del Taller para estudiantes y operarios [14]:

**Tabla 3: Velocidades de corte recomendadas en pies por minuto.**

Material Aceros AISI y SAE	Dureza HB <sup>a</sup>	Condición del material	Velocidad de corte, pies/min. Acero de alta velocidad			
			Torneado	Fresado	Taladro	Rimado
<b>Aceros normales al carbono</b>						
1006,1008,1009, 1010,1012,1015, 1016,1017,1018, 1019,1020,1021, 1022,1023,1024, 1025,1026,1513, 1514	100-125	HR,A,N,CD	120	110	100	65
	<u>125-175</u>	HR,A,N,CD	110	110	90	60
	175-225	HR,N,CD	90	90	70	45
	225-275	CD	70	65	60	40



Se obtiene:

$$v = 110 \text{ pies}/\text{min}$$

Sabiendo que:

$$1 \text{ pies} = 0.3048 \text{ m}$$

Entonces:

$$v = 33.528 \text{ m}/\text{min}$$

Utilizando la ecuación (16) se tiene:

$$n = \frac{33.528 * 1000}{\pi * 12.7}$$

$$n = 840.33 \text{ rpm}$$

Utilizando la ecuación (15) obtenemos:

$$\omega = \frac{2\pi * 840.33}{60}$$

$$\omega = 87.99 \text{ rad/s}$$

Calculando la potencia de corte con la ecuación (14), se obtiene:

$$P = 3.4 * 87.99$$

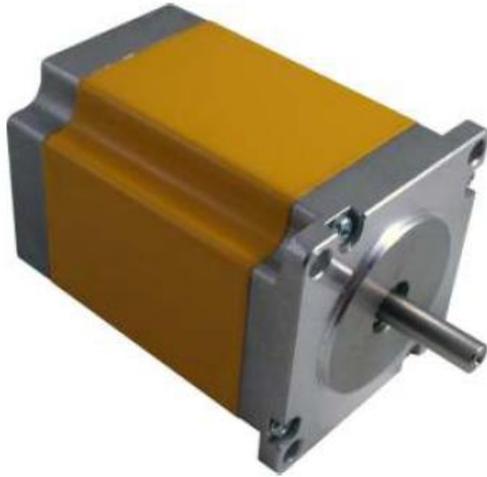
$$P = 299.16 \text{ W} = 0.40 \text{ Hp}$$



## APÉNDICE D

# ESPECIFICACIONES DEL KIT PROBOTIX

**Motores a pasos HT23-280-8**



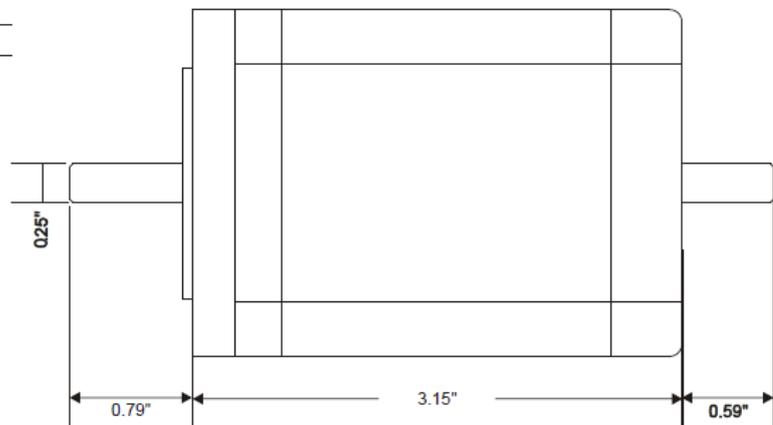
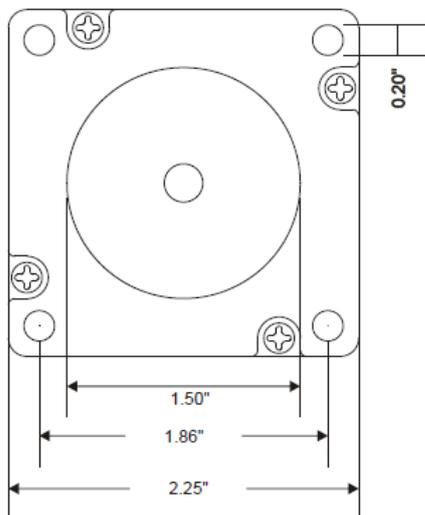
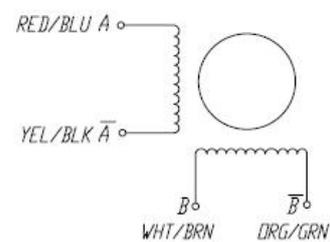
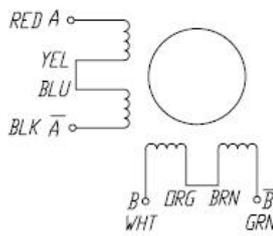
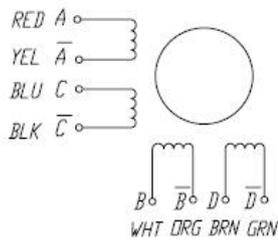
**HT23-280-8**

High Torque Stepper Motor

280 OzIn Hybrid Design

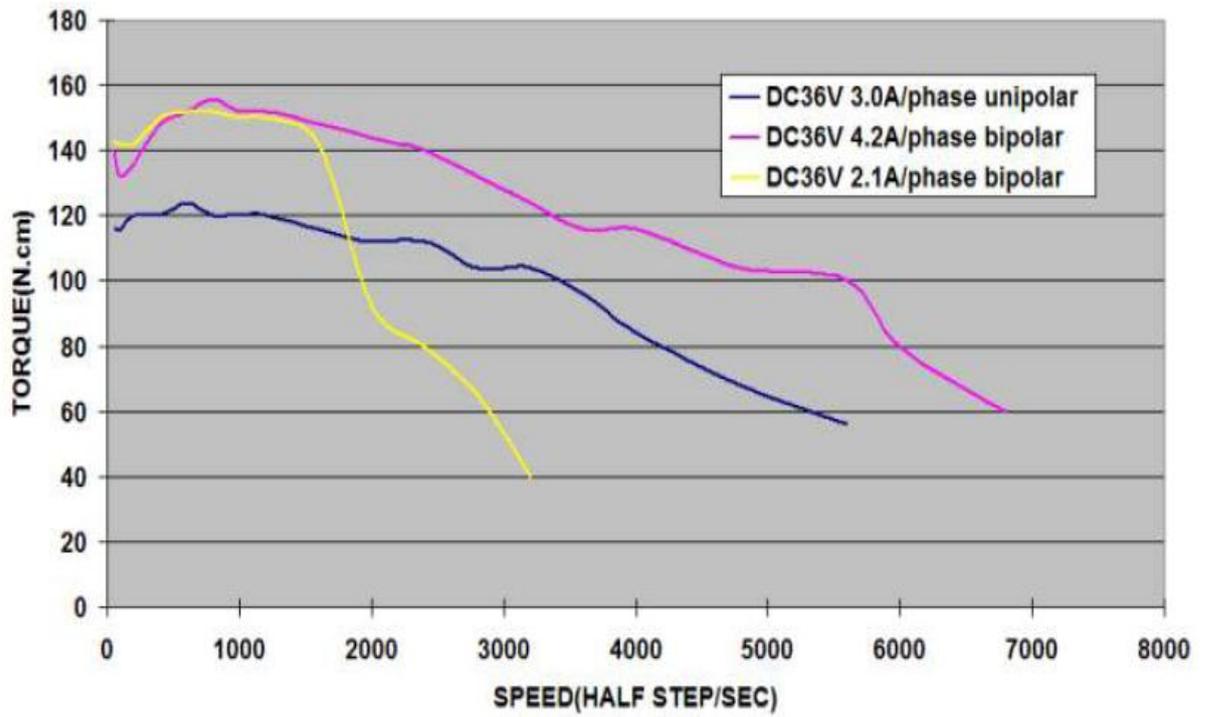
1.8 deg / 200 Steps Per Revolution

	Parallel	Series	UniPolar
Holding Torque (N.m +-10%)	2.0	2.0	1.4
Rated Current (Amps/phase)	4.2	2.1	3.0
Resistance (ohm/phase +-10%)	0.46	1.84	0.92
Inductance (mH/phase +-20%)	2.2	8.8	2.2
Rotor Inertia (g.cm 2 )	480		
Motor Weight (kg)	1.0		
Motor Length (mm)	76		
Number of Wires	8		

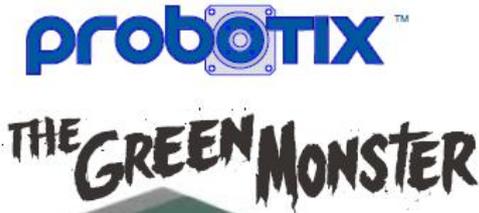




23H276-30-8B



**Motores a pasos Green Monster HT23-400-8**



**HT23-400-8**

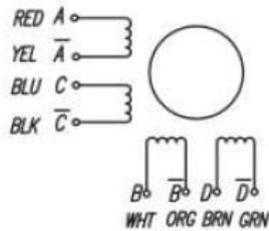
High Torque Stepper Motor

400 OzIn Hybrid Design

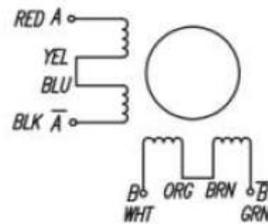
1.8 deg / 200 Steps Per Revolution

	Parallel	Series	UniPolar
Holding Torque (N.m +/-10%)	2.8	2.8	2.0
Rated Current (Amps/phase)	4.2	2.1	3.0
Resistance (ohm/phase +/-10%)	0.8	0.8	1.6
Inductance (mH/phase +/-20%)	3.8	15.2	3.8
Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	480		
Motor Weight (kg)	2.0		
Motor Length (mm)	112		
Number of Wires	8		

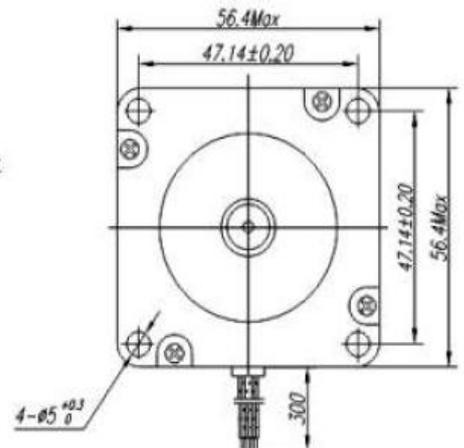
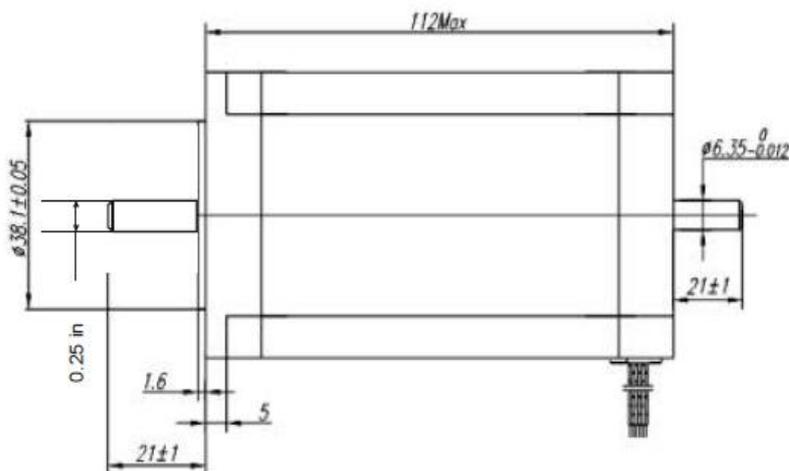
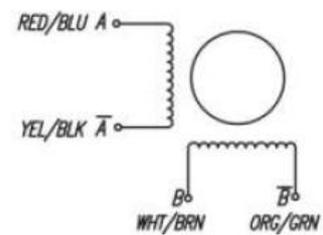
UNIPOLAR RESP. ONE WINDING



BIPOLAR RESP. BIPOLAR SERIAL

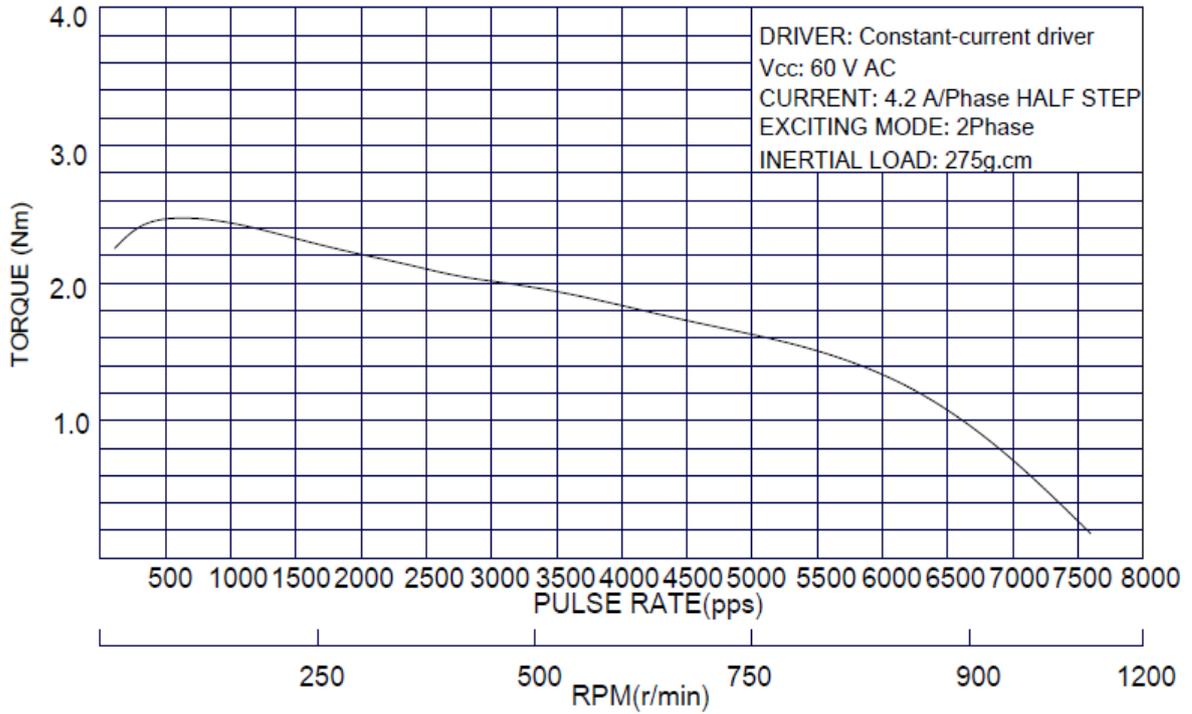


BIPOLAR ONLY PARALLEL





HT23-400-8 Torque Curve



**Tarjeta de Control de Motores a Pasos****Probo Step VX****Uni-polar Stepper Motor Chopper Driver****Stepper Motor Microstepping Driver Specs:**

- Chopper Current Driver
- 0.5 – 3 Amp Current Limiting
- Short-circuit & Open-circuit Protection
- Full, Half, Quarter, Eighth & Sixteenth Microstepping
- Buffered Step & Direction Lines
- 10V – 44V Supply
- For 5-, 6-, and 8-wire Stepper Motors

**Description:**

The ProboStep is a complete microstepping motor driver and control system with a builtin translator. It is designed to operate uni-polar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes with output drive capability of 44V and 3.0A. This driver utilizes the Sanken SLA7078MPR chip which includes built-in sense current detection and load circuit short or open protection provide lower loss and lower thermal resistance.

**Features:**

- Hardware or software selectable step and direction signals
- Current limit adjustable by potentiometer
- Wide range of motor power (10-42V)
- Power (for logic) indicator LED
- 3 A, 44 V Output Rating
- Fixed-offtime PWM blanking circuit reduces ringing
- 3.0-5.5 V Logic Supply Voltage Range
- Synchronous Rectification for Low Power Dissipation
- Internal UVLO and Short & Open Circuit Protection
- Crossover Current Protection



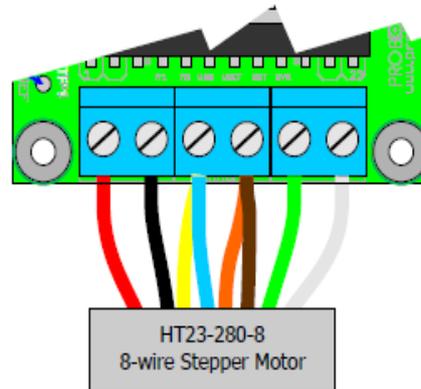
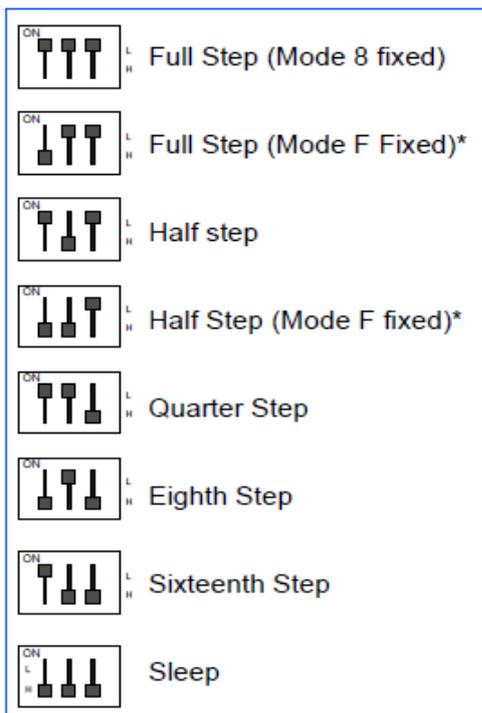
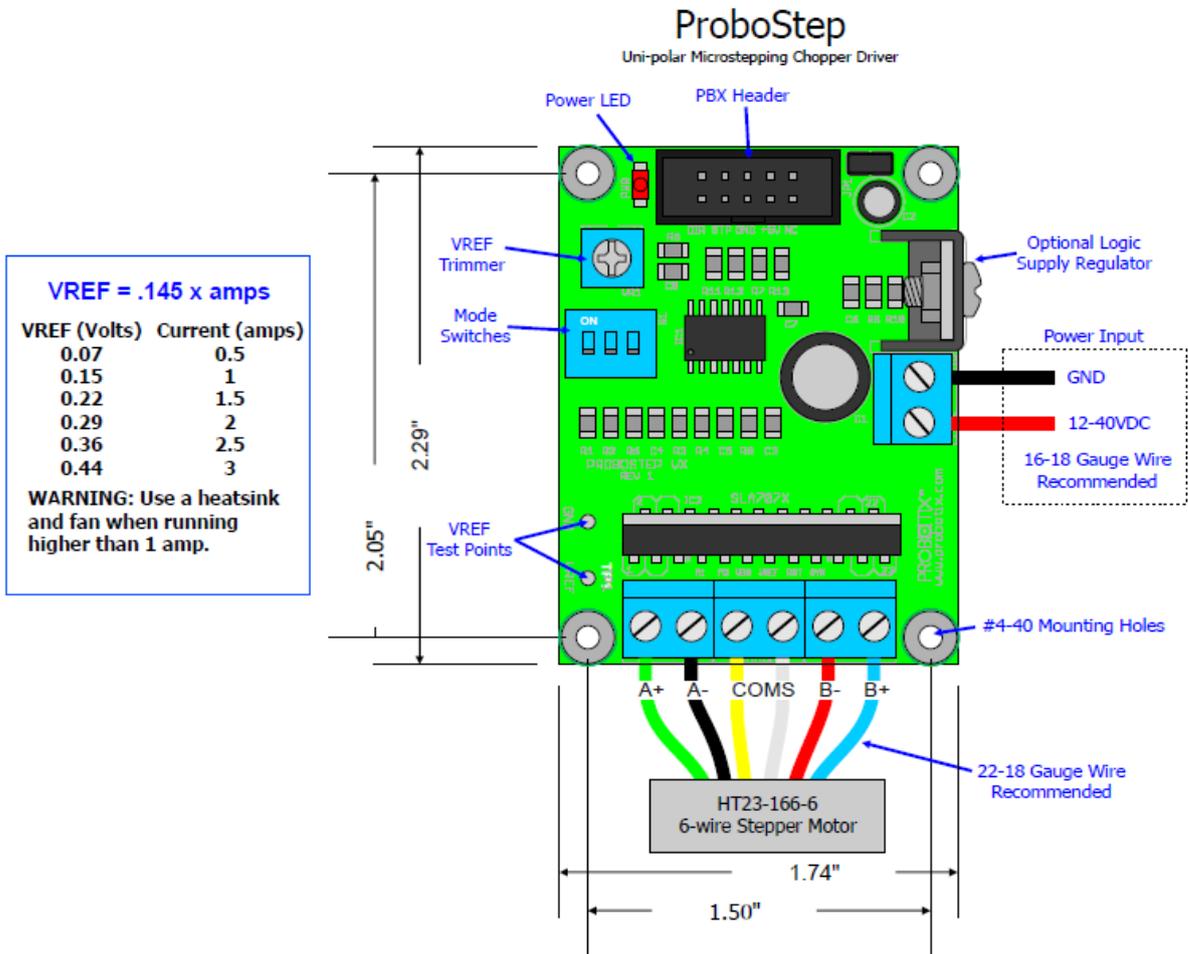
### **Flexible Design:**

The ProboStep was designed with flexibility in mind with features including:

- Internal synchronous-rectification control circuitry is provided to improve power dissipation during PWM operation.
- Internal circuit protection includes short-circuit and open-circuit protection. Special power-up sequencing is not required.
- The logic signals are brought out to a .1" pin header on one side, allowing for use of an IDC cable to connect your boards. Every other pin on the IDC header is connected to ground, which acts to shield the control signals from noise. Noise in a stepper control system can cause miss stepping, which can damage your equipment, cause injury, and ruin your work piece.
- A 111 chmitt trigger IC buffers the high voltage driver from your sensitive parallel port, and filters noise.
- Unlike the SideStep, the driver chip, the ProboStep does not have thermal protection, so a heatsink must be used when driving motors at greater than 1 amps.
- An under-voltage lockout circuit protects the A3977 from potential shoot-through currents when the motor supply voltage is applied before the logic supply voltage. All outputs are disabled until the logic supply voltage is above 2.7V; the control logic is then able to correctly control the state of the outputs.
- Patented short and open circuit protection.

### **Unipolar Chopper Drivers:**

Unipolar chopper drivers are the simplest form of stepper motor control. A set of four sink drivers control the current to each of the four half-phases of a stepper motor. The circuit includes recirculating diodes and a sense resistor that maintains a feedback voltage proportional to the motor current. The high side of the supply is split out to one side of each half-coil, and the other end of each half-coil is routed to the low-side transistor switches. Motor windings, using a chopper driver, are energized to the full supply level by turning on one set the switching transistors. The sense resistor monitors the linear rise in current until the required level is reached. At this point the switch opens and the current decays until a preset position is reached and the process starts over. This “chopping” effect of the supply is what maintains the correct current voltage to the motor at all times.



\* Mode 8 uses 70% current ratio between phases, Mode F uses 100% current ratio between phases. Mode F should provide slightly more torque while Mode 8 should give smoother motion.

## Setting Current Limit

Measure the DC voltage between the Ref Pin and GND, and adjust the trimmer as follows:  $V_{ref} = .145 \text{ desired motor current}$ .

$$3 \text{ A} = V_{ref} .44 \text{ V}$$

$$2 \text{ A} = V_{ref} .29 \text{ V}$$

$$1 \text{ A} = V_{ref} .15 \text{ V}$$

$$0.5 \text{ A} = V_{ref} .07 \text{ V}$$

1. Determine the step resolution you wish to use, and set the dip switches according to Figure 2.
2. If driving your motors at more than 1 Amp, install a heat sink over the driver chip. A fan blowing over the heatsink will extend the life of your drivers. See the thermal warning on page three.
3. Apply power.
4. Connect a voltmeter between the VREF signal and GND and adjust the current trimmer to the desired voltage determined above.

**WARNING:** If the motor is connected during this adjustment, excessive heating may occur. Most motors can NOT experience temperatures above 100°C. At these temperatures internal melting and seizure may occur. Short-term current overdrive will, in general, not harm most motors.

**WARNING:** Never remove a connection to the stepper motor with power applied. There is a possibility the SLA7078 IC will be damaged. The SLA7078 is rated for 46V DC max. The power supply voltage should be limited to ~42V DC to allow for back EMF generated by the stepper.

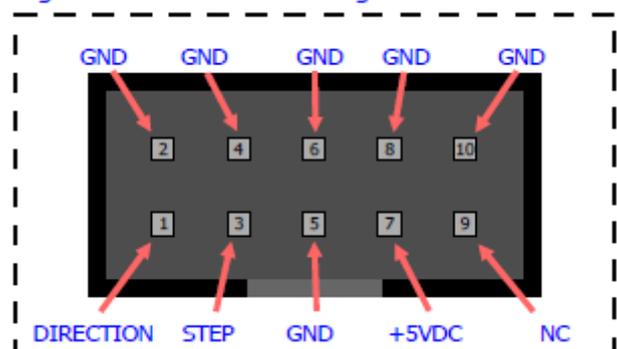
## Control Software Setup

The ProboStep is negative logic. The STEP lines should be inverted in your software. Please contact us if you need help configuring your software.

Minimum pulse width for the step pulse is 12 uS. Maximum step frequency is 40 kHz.

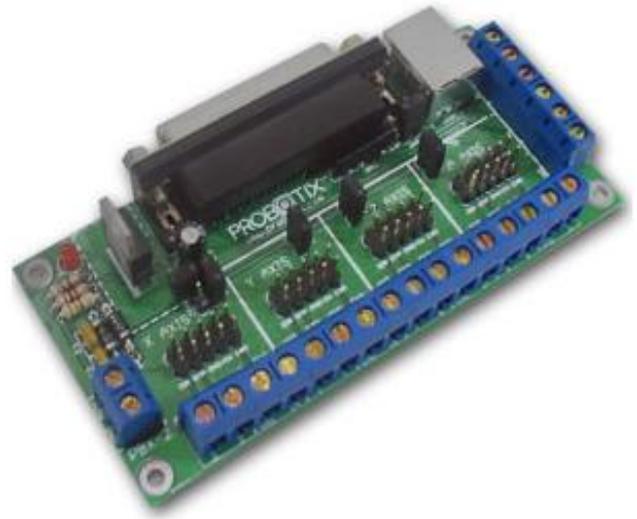
Most steppers torque really drop above 1 kHz at full step, or 8 kHz if you're using the eighth-step mode.

**Figure 1: PBX Header Pin Diagram**



**Tarjeta de Transmisión de Datos****PBX-2 Parallel Port Breakout Board****Parallel Port Breakout Board Features:**

- DB25 Female
- Flexible Design
- Onboard LM-317 Based 1.5 amp Logic Supply Regulator
- USB Logic Power Supply
- Optional Pinheader and Screw Clamp Connections
- Jumper Enabled Limit Switch Pull-up Resistors
- LED Power Indicator
- All Pins Brought Out

**Description:**

The PBX-2 is a Parallel Port breakout board designed specifically for Hobby CNC machines. It is compatible with a variety of Parallel Port CNC Control Software.

The PBX-2 has a built in LM317 based voltage regulator section that will supply 1.5AMPS @ +5V to the driver outputs of this interface. It also connects to the limit switch and e-stop inputs through a jumper connected 1K pull-up resistor network. The pullup resistors are needed in most cases when switching the logic inputs through physical switches.

The LM317 is rated for 40VDC, so you can wire it up to the same power supply as the motors. You may want to run it off of a WalWart to provide an additional layer of protection and to limit noise. Make sure to test the polarity of the wires from the WalWart, and make sure it is not an AC output device. Any voltage between 6 and 40 volts should work.

The PBX-2 has an experimental USB power supply jack. This jack can supply the +5V logic supply side of your drivers. **Do not plug in a USB cable without disconnecting JP6.** JP6 isolates the LM317 based regulator section from the rest of the circuit, including the logic power indicator LED.

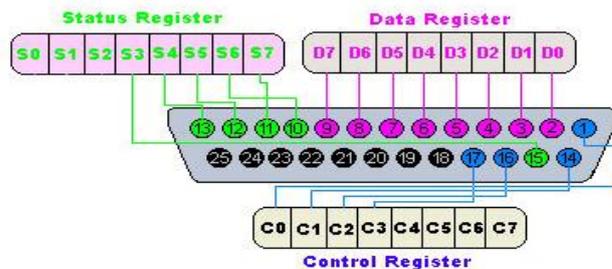
The USB specification allows the USB port to draw 100mA, without needing to enumerate. It is very likely that your PC's USB port is protected from current overdrive. Your results may vary, and I assume no liability for your PC. However, I have been using it for quite some time, on my PC. It probably would not protect you from spikes, so **USE AT YOUR OWN RISK!** I would recommend driving it through an externally powered USB hub.

The IDC cables can supply logic side power to your driver boards. Some of our drivers also have on-board logic supply regulators. **Use the jumpers to ensure that both regulator sections are not connected at the same time.**

The Parallel Port was primarily designed for controlling printer devices, so on some pins the logic inside of the PC is inverted for different reasons. The built in parallel port on your PC generally shows up at address 0x378, but that is determined by your BIOS

The PBX-2 is not an isolated breakout board. We strongly recommend that you use an add-on parallel port card. Be aware that those \$10 MOSCHIP NM9805 Chipset driven boards will initialize at non-standard addresses. The Windows XP drivers will not let you change the address. This is not a problem for EMC or Mach3, but currently Kcam will not allow you to use a non-standard parallel port address.

Here is a pinout of a DB25 parallel port:



Pin No (DB25)	Signal name	Direction	Register - bit	Inverted
1	nStrobe	Out	Control-0	Yes
2	Data0	In/Out	Data-0	No
3	Data1	In/Out	Data-1	No
4	Data2	In/Out	Data-2	No
5	Data3	In/Out	Data-3	No
6	Data4	In/Out	Data-4	No
7	Data5	In/Out	Data-5	No
8	Data6	In/Out	Data-6	No
9	Data7	In/Out	Data-7	No
10	nAck	In	Status-6	No
11	Busy	In	Status-7	Yes
12	Paper-Out	In	Status-5	No
13	Select	In	Status-4	No
14	Linefeed	Out	Control-1	Yes
15	nError	In	Status-3	No
16	nInitialize	Out	Control-2	No
17	nSelect-Printer	Out	Control-3	Yes
18-25	Ground	-	-	-



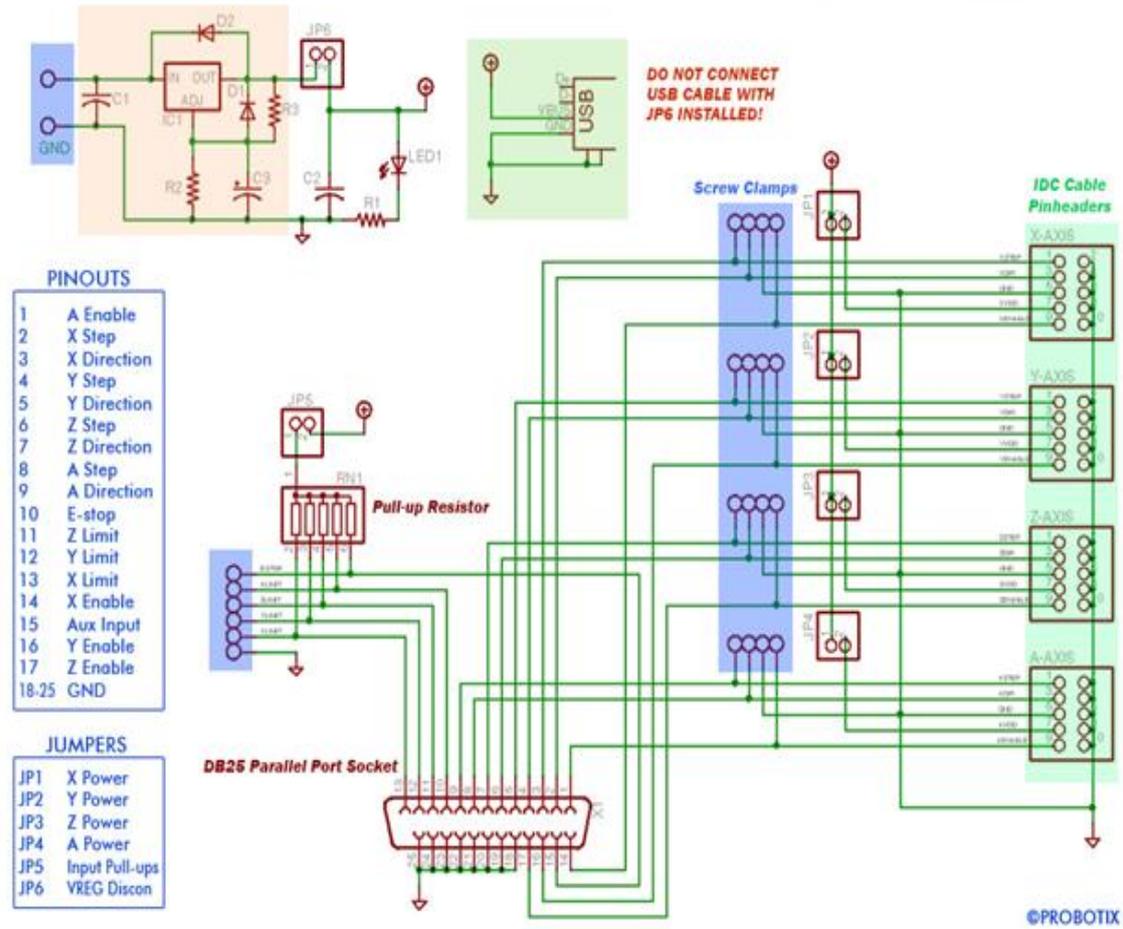
Please note how they are designated inputs, outputs, or both. Also, some of them are inverted. Depending on the software you choose to control it, the configurations may need to be inverted on certain inputs or outputs. Without going into the details, just know that you may have to try different settings to get your machine to respond properly.

Here is the intended and typical pinout of the PBX-2 CNC interface:

<b>PIN</b>	<b>Signal</b>
<b>1</b>	A Enable
<b>2</b>	X Step
<b>3</b>	X Direction
<b>4</b>	Y Step
<b>5</b>	Y Direction
<b>6</b>	Z Step
<b>7</b>	Z Direction
<b>8</b>	A Step
<b>9</b>	A Direction
<b>10</b>	E-stop
<b>11</b>	Z Limit
<b>12</b>	Y Limit
<b>13</b>	X Limit
<b>14</b>	X Enable
<b>15</b>	Aux Input
<b>16</b>	Y Enable
<b>17</b>	Z Enable
<b>18</b>	-25 GND

**Schematic:**

PBX-2 CNC Interface



©PROBOTIX

## Tarjeta de Transmisión de Datos

### Special Features:

- AC input range selected by switch
- High efficiency
- DC adjust range
- LED Power indicated
- Output reverses protection
- Free air cooling convection
- 199\* 97\* 50 mm
- Weight 0.73 kgs/pcs
- 1 year warranty



### Specification:

#### **Output**

Maximum power.....150 Watts  
DC adjust range..... 10% of rating output voltage  
Hold-up time.....> 20 ms at 230Vac/ 50Hz  
Rise time.....< 20ms  
Over Voltage Protection...110% ~ 135% of rated output  
Over Power Protection.....105% ~ 150%, auto-recovery  
Short Circuit Protection.....shut off, AC recycle to restart  
Connector.....7P / 9.5mm pitch terminal block

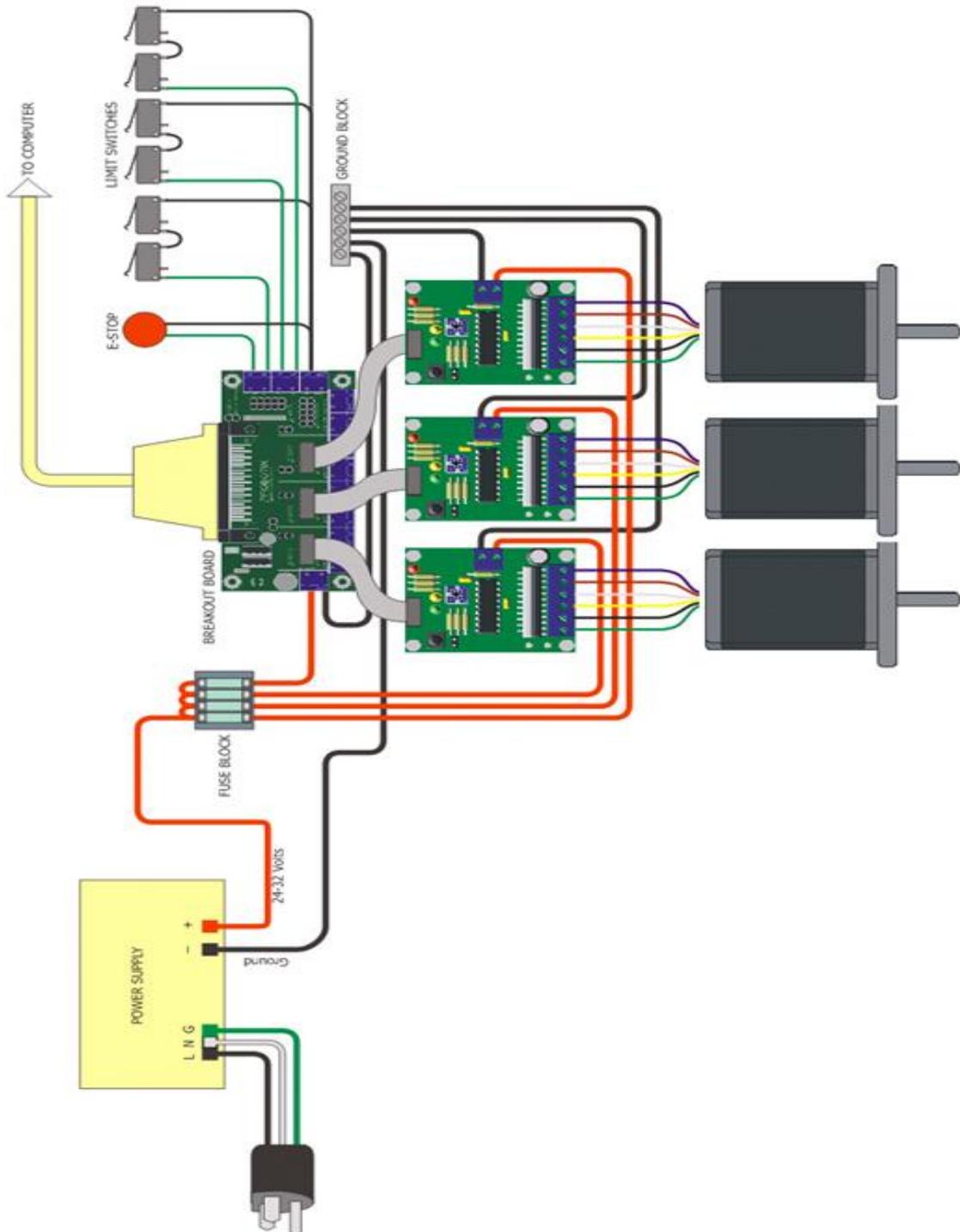
#### **Input**

Input range.....90~132Vac/180~264Vac selected by switch  
Frequency.....47-63Hz  
AC inrush current...Cold start, 30A @ 115Vac; 60A @ 220Vac  
EMI/RFI.....FCC Part 15J, Class A & CISPR 22 Class A

#### **Operating temperature**

0°C to +40°C @ 100%; -10°C @ 80%; 50°C @ 60% load  
Storage temperature: -20°C to +80°C  
Free air cooling convection

Diagrama de conexiones del Kit de Motores



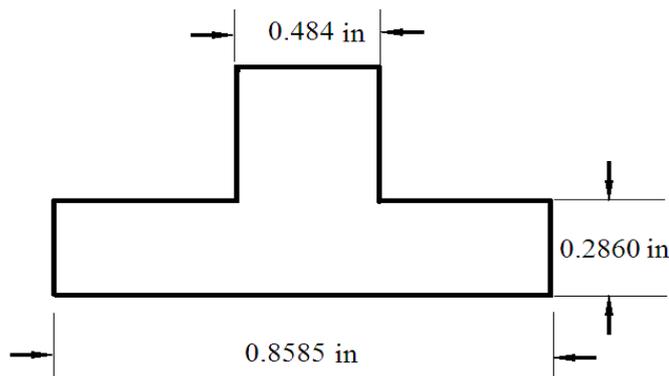


## APÉNDICE E

# SELECCIÓN DE CORTADOR WOODRUFF

Se utilizó una fresa (cortador) en T para cuñero Wooddruff de la marca Toolmex, ya que éste permite maquinarse cuñeros y ranuras en T.

Para seleccionar el número de parte de este cortador, se midió una tuerca T de 3/8" y se obtuvieron las medidas que se muestran en la figura 1.



**Figura1. Dibujo de la tuerca T de 3/8".**

El ancho de la base de la tuerca T es de 0.858", esta medida corresponde al diámetro nominal del cortador, el ancho de cara de la tuerca es de 0.2868" y el ancho de la T es de 0.484". Por ello se selecciona el cortador Woodruff tmx 807 con mango recto diámetro 1/2". Ver tabla 1.

**Tabla1. Parámetros del cortador Woodfruff.**

Estándar Americano	Diámetro Nominal	Ancho de Cara	Largo Total	Código Dientes Rectos	Código Dientes Alternos
806	3/4	1/4	2-1/4	5-727-050	5-728-050
507	7/8	5/32	2-5/32	5-727-055	5-728-055
606	3/4	3/16	2-3/16	5-727-060	5-728-060
607	7/8	3/16	2-3/16	5-727-065	5-728-065
707	7/8	7/32	2-7/32	5-727-070	5-728-070
608	1	3/16	2-3/16	5-727-075	5-728-075
708	1	7/32	2-7/32	5-727-080	5-728-080
1208	1	3/8	2-3/8	5-727-085	5-728-085
609	1-1/8	3/16	2-3/16	5-727-090	5-728-090
<b>807</b>	<b>7/8</b>	<b>1/4</b>	<b>2-1/4</b>	<b>5-727-095</b>	<b>5-728-095</b>
808	1	1/4	2-1/4	5-727-100	5-728-100
709	1-1/8	7/32	2-7/32	5-727-105	5-728-105
809	1-1/8	1/4	2-1/4	5-727-110	5-728-110
610	1-1/4	3/16	2-3/16	5-727-115	5-728-115
710	1-1/4	7/32	2-7/32	5-727-120	5-728-120



## APÉNDICE F

# COSTOS



Para construir la máquina se utilizaron los siguientes elementos:

Concepto	Cantidad	Precio
Guías lineales	6	\$ 18,324.46
Husillos de bolas y tuercas de bolas	3	
Kit de motores		\$ 7,036.56
Rodamientos	6	\$ 232.74
Placas de acero	5	\$ 1,426.30
Placa de acero para mesa y rectificado	1	\$ 500.00
Placas de acero para rodamientos	6	\$ 200.00
Barra de aluminio	1	\$ 250.00
Placas de aluminio	2	
Tornillos 5mm	38	\$ 38.00
Tornillos 4mm	50	\$ 45.00
Tornillos 3/8 x 1"	26	\$ 104.00
Tornillos 5/16 x 1-1/2"	6	\$ 12.00
Tornillos 5/16 x 2-1/2"	4	\$ 14.00
Tornillos 5/16 x 4"	2	\$ 24.00
Pernos de sujeción 3/8 x 1"	12	\$ 144.00
Opresores	3	\$ 15.00
Prymer en aerosol	2	\$ 186.80
Pintura en aerosol	2	
Gabinete	1	\$ 380.00
Señalador Led	1	\$ 180.00
Micro-switch rojo	1	\$ 33.00
Selector	1	\$ 150.00
Fusibles	4	\$ 16.00
Porta-fusibles europeos	4	\$ 28.00
Disipadores	3	\$ 60.00
Ventilador	1	\$ 60.00
Micro-switch	6	\$ 90.00
Cable	25 metros	\$ 62.50
Protector cable	3 metros	\$ 24.00
Termofit	3 metros	\$ 17.00
Cortadores de 4 gavilanes de 1/8" de punta redonda	2	\$ 282.00
Acrílicos	5	\$ 100.00
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 30,035.36</b>