



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

*Trabajo Terminal II*

**“Prototipo de Torno CNC para Maquinado de  
Probetas”**

*Que para obtener el título de*

**“Ingeniero en Mecatrónica”**

Presentan:

**Bermúdez Angeles Juan Alejandro**

**Orendain García David**

Asesores:

M. en C. Víctor Darío Cuervo Pinto

Ing. Érick Huitrón Ramírez

M. en C. Juan Carlos Guzmán Salgado



AGOSTO 2015



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS



*Trabajo Terminal II*

## “Prototipo de Torno CNC para Maquinado de Probetas”

*Que para obtener el título de*

**“Ingeniero en Mecatrónica”**

Presentan:

---

Bermúdez Angeles Juan  
Alejandro

---

Orendain García David

Asesores:

---

M. en C. Víctor Darío  
Cuervo Pinto

---

Ing. Érick Huitrón Ramírez

---

M. en C. Juan Carlos  
Guzmán Salgado

**Presidente del Jurado**

**Profesor titular**



---

M. en C. Abraham Rodriguez  
Galeotte

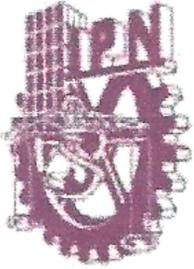
---

M. en C. Héctor Jonatan  
Hernández Marín



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS



*Trabajo Terminal II*

## “Prototipo de Torno CNC para Maquinado de Probetas”

*Que para obtener el título de*

“Ingeniero en Mecatrónica”

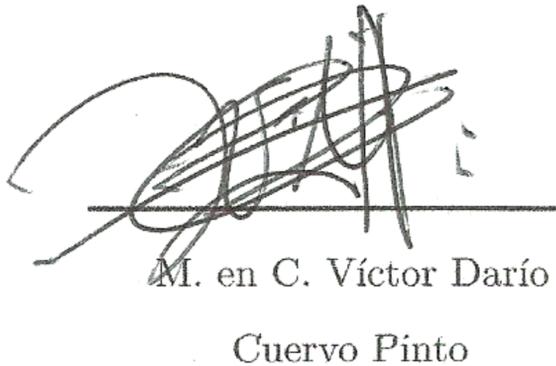
Presentan:

  
Bermúdez Angeles Juan

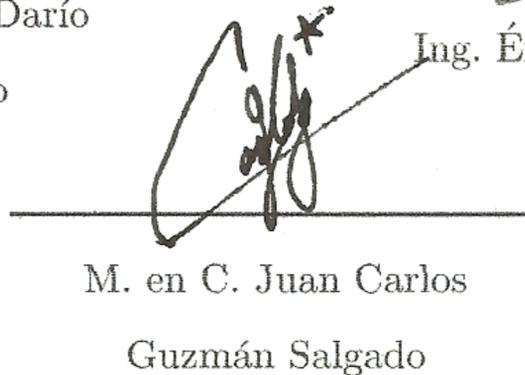
Alejandro

  
Orendain García David

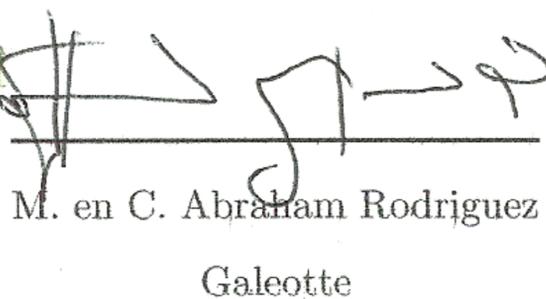
Asesores:

  
M. en C. Víctor Darío  
Cuervo Pinto

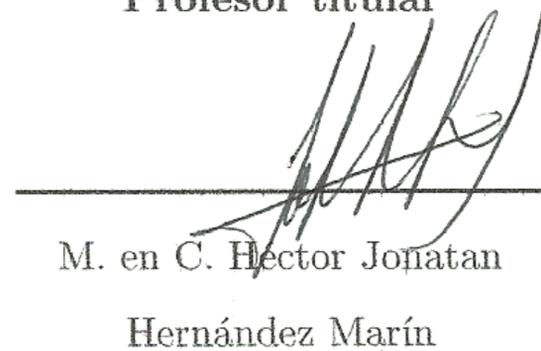
  
Ing. Érick Huitrón Ramírez

  
M. en C. Juan Carlos  
Guzmán Salgado

Presidente del Jurado

  
M. en C. Abraham Rodríguez  
Galeotte

Profesor titular

  
M. en C. Héctor Jonatan  
Hernández Marín



# **Dedicatorias**

## **Juan Alejandro Bermúdez Angeles**

Dedico este proyecto a mis padres, Juan Bermúdez Galán y Miriam Angeles Hernández, por su apoyo incondicional, sin el cual no habría llegado hasta aquí; igualmente a mi hermano Daniel Bermúdez Angeles por estar a mi lado y ayudarme en lo que fuera necesario.

A mis amigos y familiares que estuvieron conmigo durante toda la carrera, cuyo cariño y ayuda fueron imprescindibles para poder seguir adelante y no rendirme; especialmente a David Orendain García, que fue parte esencial para terminar mi carrera.

## **David Orendain García**

Dedico esta tesis a mis padres Antonio Orendain y Concepción Garcia que me han apoyado siempre y en todo.

A mi novia Diana Perea que siempre estuvo a mi lado apoyándome e impulsándome a no rendirme y seguir adelante.

A mis amigos que me han ayudado mucho a lo largo de mi estancia en UPIITA, en especial a Juan Alejandro que me acompañó a durante el desarrollo de este proyecto.



# Agradecimientos

Agradecemos en gran medida el apoyo del Dr. Sebastián Díaz de la Torre que nos brindó diversos materiales y facilidades para llevar a cabo del proyecto. A los trabajadores del taller del CIITEC por brindarnos asesoría y facilitarnos el uso de maquinaria, en especial a Juan García.

Agradecemos a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas por brindarnos sus instalaciones y a sus maestros por acompañarnos durante toda nuestra trayectoria.

## **Juan Alejandro Bermúdez Angeles**

Agradezco a mis padres y mi hermano por el ayuda brindada y su apoyo continuo a lo largo de mis estudios, por su cariño y comprensión. A mis amigos y familiares que me dieron su apoyo y que hicieron más fácil el camino. De igual manera a mi compañero David que estuvo conmigo en este proyecto, fue un gran equipo y su apoyo hizo posible la conclusión favorable de éste.

A nuestros asesores y profesores que nos auxiliaron y nos dieron su ayuda a lo largo del desarrollo del trabajo, sus conocimientos y pericia nos hicieron posible terminarlo. A México, puesto que su gente y su cultura hacen posible la realización de proyectos como éste y la existencia de mi alma mater el IPN.

## **David Orendain García**

Agradezco a mi familia por brindarme su apoyo para continuar mis estudios en especial a mis padres Antonio Orendain y Concepción García, y a mi novia Diana Perea por estar a mi lado a pesar de todo.

Agradezco a mi compañero Juan Alejandro por seguir adelante con este proyecto a pesar de las dificultades que se fueron presentando.

Agradezco en gran medida a nuestros asesores por haber estado apoyándonos en este proyecto.



# Tabla de contenido

Dedicatorias .....	I
Agradecimientos .....	III
Índice de Figuras .....	VII
Índice de Tablas .....	VIII
Resumen .....	X
Introducción.....	XI
Capítulo 1. Marco Teórico.....	1
1.1 Aspectos básicos.....	1
1.2 Aspectos mecánicos.....	5
1.3 Aspectos del control y la programación .....	10
1.4 Aspectos eléctricos-electrónicos.....	17
Capítulo 2. Diseño conceptual.....	21
2.1 Planteamiento del problema .....	21
2.2 Propuesta de solución .....	22
2.3 Principios de solución.....	23
Capítulo 3. Diseño de materialización.....	27
Capítulo 4. Diseño de detalle.....	35
4.1 Diseño mecánico.....	35
4.2 Diseño eléctrico-electrónico .....	38
4.3 Diseño del control y la programación .....	45
Capítulo 5. Rediseño .....	47
5.1 Diseño electrónico .....	47
5.2 Diseño eléctrico .....	48
5.3 Diseño mecánico.....	49

Capítulo 6. Construcción e implementación .....	53
6.1 Construcción mecánica.....	53
6.2 Construcción eléctrica y electrónica.....	65
6.3 Programación.....	69
Capítulo 7. Resultados.....	71
Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro .....	75
8.1 Conclusiones.....	75
8.2 Trabajo a futuro .....	76
Glosario .....	77
Apéndice. Planos y diagramas.....	81
Anexo. Hojas de datos y tablas de especificaciones.....	95
Referencias .....	101

# Índice de Figuras

Figura 1. Torno mecánico paralelo.....	1
Figura 2. Gráfica de esfuerzo-deformación del aluminio a tensión. ....	6
Figura 3. Comportamiento del acero a tensión.....	7
Figura 4. Conector tipo A.....	12
Figura 5. Conector tipo B.....	12
Figura 6. Conexiones USB.....	13
Figura 7. Esquema general de funcionamiento del prototipo.....	25
Figura 8. Medidas de una probeta cilíndrica.....	28
Figura 9. Estructura del prototipo.....	33
Figura 10. Diseño conceptual del prototipo.....	34
Figura 11. Perfil cuadrado de acero inoxidable.....	35
Figura 12. Medidas básicas de un rodamiento.....	38
Figura 13. Comportamiento del Par versus la Velocidad en RPM de un motor a pasos.....	40
Figura 14. Potencia disipada versus Temperatura del circuito A4988.....	43
Figura 15. Conexiones del controlador A4988.....	44
Figura 16. Conexiones del circuito A4988.....	45
Figura 17. Conexión de microcontrolador.....	48
Figura 18. Cono morse de plato giratorio y eje.....	51
Figura 19. Vista del sistema de transmisión.....	51
Figura 20. Vista superior del sistema de transmisión.....	52
Figura 21. Placa base de estructura.....	54
Figura 22. Cople del motor con catarina.....	55
Figura 23. Eje de transmisión.....	55
Figura 24. Acero para plato giratorio.....	56
Figura 25. Vista frontal del plato giratorio.....	57
Figura 26. Vista posterior del plato giratorio.....	57
Figura 27. Perro de arrastre.....	58
Figura 28. Contrapunto y rodamiento.....	59
Figura 29. Eje de contrapunto.....	59

Figura 30. Portaherramientas.....	60
Figura 31. Eje con componentes unidos a motor.....	61
Figura 32. Eje de plato giratorio con todos los componentes integrados.....	62
Figura 33. Sistema mecánico.....	63
Figura 34. Sistema mecánico con probeta.....	64
Figura 35. Fuente de alimentación general.....	65
Figura 36. Controladores de motores a pasos.....	66
Figura 37. Circuitos en estructura.....	66
Figura 38. Motor de corriente directa en estructura.....	67
Figura 39. Motores a pasos en la estructura.....	68
Figura 40. Sensor de fin de carrera.....	69
Figura 41. Computadora conectada al sistema.....	70
Figura 42. Cilindro de aluminio en prototipo.....	72
Figura 43. Prototipo de torno CNC para maquinado de probetas.....	73

## Índice de Tablas

Tabla 1. Dimensiones de probetas para pruebas mecánicas ASTM.....	28
Tabla 2. Velocidades de manufacturado para algunos metales.....	29
Tabla 3. Fuerzas de corte.....	30
Tabla 4. Características del rodamiento 1208.....	38
Tabla 5. Características motor a pasos.....	39
Tabla 6. Características del controlador.....	42
Tabla 7. Resoluciones de paso.....	44
Tabla 8. Especificaciones del motor.....	49

# Prototipo de torno CNC para maquinado de probetas

## *Abstract*

*The project takes the design of a CNC metalworking lathe that works with cylindrical pieces of aluminum or steel so it transforms them into mechanic tests specimen. There will be an interface which will show the specifications of the pieces and control the system according to the user's entries. The dimensions of the system must be reduced, corresponding to its use, which is focused into the research and laboratory tests. The final objective is to create a low cost CNC machine with little weight and good precision, so it has been done a wide research in morphology, design and utility of the involved components like electrical, electronical, mechanical or control, selecting the most appropriated and with responses in the established tolerances. The project, however, is a prototype, so the final product may not correspond to the perfection with the requirements specified in tables, although they will be of an approximated quality, besides, it will prove the functionability and viability of the lathe for a future implementation.*

## *Résumé*

*Le projet aborde le dessin d'une machine-outil tour à commande numérique qui prendre pièces cylindriques d'aluminium et d'acier pour les transformer en éprouvettes destinées à des essais. Ceci aura une interface humain-machine qui couvrira les spécifications des pièces et contrôle du système d'accord avec les entrées de l'utilisateur. Les dimensions du système seront réduites, en correspondant avec son usage, qui est le travail de laboratoire. Le objective final c'est de créer un MOCN de prix bas et ne pas lourde mais avec de la précision; c'est pour cela qu'on a fait de la recherche en morphologie, dessine et utilité des composantes involucrées soient électriques, électroniques, mécaniques ou de contrôle, en*

*sélectionnant les plus appropriées et avec les réponses plus près à les tolérances. Le projet, néanmoins, c'est seulement un prototype, alors le produit final ne pourrait pas correspondre parfaitement avec les réquisits spécifiées dans des tables, or il aura une qualité très bonne et prouvera la fonctionnalité et viabilité du MOCN pour une implémentation future.*

## **Resumen**

El proyecto aborda el diseño de un torno CNC que manufacture piezas cilíndricas de aluminio o acero para transformarlas en probetas para pruebas mecánicas. Éste deberá tener una interfaz que mostrará las especificaciones de las piezas y el control del sistema de acuerdo a las entradas que provea el usuario. Las dimensiones del sistema tendrán que ser reducidas, correspondiendo a las de su uso, que está enfocado a la investigación y pruebas de laboratorio. El objetivo final es crear un CNC de bajo costo con un peso bajo y buena precisión; para lo cual se ha hecho una investigación en cuanto morfología, diseño y utilidad de los componentes involucrados, tanto eléctricos, electrónicos, mecánicos y de control, seleccionando los más aptos y con respuestas que estén sobre la tolerancia establecida dependiendo de los cálculos que se han hecho. El proyecto, sin embargo, es un prototipo, por lo que el producto terminado puede no corresponder a la perfección con los requerimientos especificados en tablas, que no obstante, serán de una calidad aproximada; además probará la funcionalidad y viabilidad del torno para una futura implementación de construcción a detalle.

## ***Palabras Clave***

Algoritmos de Comunicación, Control Numérico por Computadora, Interfaz Gráfica, Probeta, Torno.

# **Introducción**

## **Antecedentes**

En la actualidad, la necesidad de crear piezas con un alto grado de precisión y en un tiempo corto es constante en empresas, industria e investigación; sin embargo, muchas veces es muy difícil conseguirlas o hacerlas y la insuficiencia de maquinaria o técnicos es la principal causa de esto. Cuando el nivel de exigencia de la parte petitoria es alto, el grado de exactitud en que se hará la pieza es bastante importante y los componentes hechos para investigaciones especializadas y trabajos de tecnologías avanzadas son los que normalmente requieren este tipo de producción.

Las probetas para pruebas de materiales tales como torsión, flexión y compresión necesitan tener un torneado escrupuloso en el que se cumplan las normas establecidas para dichos ensayos, las cuales dictan medidas y formas definidas. Por lo que es imperativo crear una máquina capaz de desarrollar este tipo de piezas de una manera sencilla, rápida y fiel, para lograr reducir las dificultades que ingenieros e investigadores podrían tener al conseguir el material de trabajo necesario para su búsqueda.

## **Justificación**

La propuesta para hacer este proyecto surge a partir de la inquietud de realizar una máquina capaz de solucionar un problema en el área de investigación, dado que el tiempo invertido en manufacturar una pieza podría ocuparse en tareas académicas útiles para el investigador en lugar de construir el objeto de estudio. Es decir, creemos que el facilitar las herramientas necesarias y los materiales ya preparados, ayudará a la investigación en muchas maneras.

La construcción y diseño de un torno CNC será de gran utilidad en el Instituto Politécnico Nacional, dado que se sentarán bases para que esta idea sea mejorada en un futuro o sea implementada de otra manera para realizar una tarea completamente diferente. Después de consultar trabajos realizados en la escuela, se encontró que no hay suficientes proyectos o

información en la unidad acerca de tornos automatizados, de igual manera no se hallaron tornos desarrollados en el IPN ni en el país que se asemejen a nuestro prototipo.

Por último se puede mencionar que el costo implicado en la adquisición de un torno CNC es de mínimo \$60 000.00 (Metal Lathes | eBay, 2015) si se trata de uno de segunda mano, por lo que nuestro prototipo supondrá una inversión menor; de igual manera, las necesidades de suelo y espacio serán menores comparadas con las demandadas por un torno comercial, además de que al tener un objetivo determinado, el tiempo será aprovechado de mejor manera pues la máquina operará de manera específica en las tareas asignadas.

## **Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de un torno CNC que permita manufacturar probetas cilíndricas de aluminio y acero.

## **Objetivos Particulares**

- Diseñar y construir una estructura conveniente que permita torneear piezas en forma de probetas con ayuda de dos ejes.
- Diseñar y construir el portaherramientas que se utilizará.
- Diseñar e implementar el sistema de transmisión de movimiento.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica.
- Diseñar y construir el esquema electrónico para el control de operación del prototipo.
- Diseñar e implementar la comunicación entre la computadora y el sistema con el programa que operará la máquina.
- Integrar todos los subsistemas correspondientes a la estructura.
- Realizar procedimientos de validación del prototipo final.

# Capítulo 1. Marco Teórico

## 1.1 Aspectos básicos

### Torno mecánico paralelo

Se denomina torno a un conjunto de máquinas herramienta que permiten mecanizar piezas de forma geométrica de revolución. Estas máquinas herramienta operan haciendo girar la pieza a maquinar, sujeta en el cabezal, mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento controlado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas; dependiendo del material a maquinar puede variar la velocidad de manufacturado (Correa, 2008).

La herramienta de corte va montada sobre un carro que se desplaza sobre unas guías o rieles paralelos al eje de giro de la pieza que se tornea, llamado eje Z; sobre este carro hay otro que se mueve según el eje X, en dirección radial a la pieza que se tornea, y puede haber un tercer carro llamado carro orientable que se puede inclinar, para hacer conos, y donde se apoya la torreta portaherramientas.

Cuando el carro principal desplaza la herramienta a lo largo del eje de rotación, produce el cilindrado de la pieza, y cuando el carro transversal se desplaza de forma perpendicular al eje de simetría de la pieza se realiza la operación denominada refrentado (F.Krar Steve, 2009).



*Figura 1. Torno mecánico paralelo.*

La forma básica de las probetas es un cilindro con una sección media de diámetro considerablemente menor al original y de una longitud aproximadamente de un tercio de la pieza. Las dos partes están unidas por suaves pendientes o conos que tienen un ángulo establecido en distintas normas. Dadas las consideraciones anteriores, las primeras características podrían hacerse con la operación de cilindrado, mientras que la segunda se haría con un desbastado controlado para hacer conos. (ElPrisma, 2014)

## **Cilindrado**

El cilindrado es una operación realizada en el torno mediante la cual se reduce el diámetro de la barra de material que se está trabajando. Para poder efectuar esta operación, la herramienta y el carro transversal se han de situar de forma que ambos formen un ángulo de 90° (perpendicular), y éste último se desplaza en paralelo a la pieza en su movimiento de avance. En este procedimiento, el acabado que se obtenga puede ser un factor de gran relevancia; variables como la velocidad y la cantidad de material que se corte en un pase, así como también el tipo y condición de la herramienta de corte que se esté empleando, deben ser observados. (Teruel, 2009)

## **Refrentado**

El refrentado es la operación realizada en el torno mediante la cual se mecaniza el extremo de la pieza, en el plano perpendicular al eje de giro. Para poder efectuar esta operación, la herramienta se ha de colocar en un ángulo aproximado de 60° respecto al portaherramientas. (Teruel, 2009)

## **Control numérico por computadora**

Su nombre comercial es CNC, siglas en inglés para *Computer Numerical Control*. Es un programa capaz de dirigir el posicionamiento de un sistema mecánico móvil mediante órdenes elaboradas de forma totalmente automática a partir de informaciones numéricas en tiempo real. Estas son dadas por una computadora que determina la posición y velocidad de los motores que accionan la máquina. El torneado y fresado son operaciones de manufactura que se pueden realizar en dichos sistemas (UNAC, 2014).

El control numérico por computadora es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico, normalmente una herramienta que está montada en una máquina. Esto quiere decir que mediante un *software* y un conjunto de órdenes, se controlarán las coordenadas de posición de un punto respecto a un origen. Se sabe que el control numérico es un sistema que aplicado a máquinas herramienta automatiza los movimientos de las partes de las máquinas, insertando al sistema instrucciones codificados en forma de números y letras. El sistema interpreta, en forma automática, esos datos y los convierte en señales de salida, a su vez esas señales controlan varios componentes de la máquina como el encendido y apagado, giro del husillo, cambio de herramienta, desplazamiento de la pieza o las herramientas, etc. lo que permite el mecanizado de las piezas en tiempos reducido, con mayor precisión, acabado de calidad y en mayor cantidad. El programador puede preparar el programa para una pieza en un lugar o espacio remoto; puede incorporar información obtenida de algún dibujo técnico, para asegurar que no haya errores, simular el maquinado y guardarla en la memoria de la computadora hasta que se requiera mecanizar la pieza (Castillo, 2004).

Algunas de las ventajas, en cuestión de maquinado, que tiene un sistema como este contra la manufactura convencional, son las siguientes: permite una mejor planeación de las operaciones, se incrementa la flexibilidad de maquinado, reducción en tiempo de programación, mejor control del proceso y tiempos de maquinado, disminución en los costos por herramientas, se incrementa la seguridad para el usuario, reducción del tiempo de flujo de material, reducción del manejo de la pieza de trabajo, aumento de productividad y aumento en precisión. (UBA-FI, 2014)

## **Códigos G & M**

La programación nativa de la mayoría de las máquinas de Control Numérico Computarizado se efectúa mediante un lenguaje de bajo nivel llamado G & M. (G & M Codes, 2015)

Se trata de un lenguaje de programación vectorial mediante el que se describen acciones simples y entidades geométricas sencillas (básicamente segmentos de recta y arcos de circunferencia) junto con sus parámetros de maquinado (velocidades de husillo y de avance de herramienta). El nombre G & M viene del hecho de que el programa está constituido por instrucciones Generales y Misceláneas.

Si bien en el mundo existen aún diferentes códigos de programación con códigos G & M, se dio un gran paso adelante a través de la estandarización que promovió la ISO (*International Organization for Standardization*, Organización Internacional para la Estandarización en español); ésta fue adoptada por la totalidad de los fabricantes industriales serios de CNC y permite utilizar los mismos programas en distintas máquinas CNC de manera directa o con adaptaciones menores.

**Mastercam.** (Mastercam CAD-CAM Software, 2015) es un software de CAD-CAM (*Computer-Aided Design* y *Computer-Aided Manufacturing* que significan Diseño Asistido por Computador y Manufactura Asistida por Computadora respectivamente) que implementa la fabricación por computadora, desde el diseño a la comunicación con la máquina, para automatizar la programación de las siguientes máquinas:

- Fresadoras o centros de mecanizado desde 2 ejes hasta 5 ejes simultáneos.
- Tornos con 2 ejes o Centros de Torneado con 3, 4 o 5 ejes.
- Corte con Electroerosión de Hilo, laser, plasma, etc.
- Programación de Robots.

**Mastercam Torno.** Soluciona las necesidades de programación de tornos desde 2 ejes hasta centros de torneado con 5 ejes o más. A continuación se enuncian algunas de sus características:

- Programación de trayectorias de torno.
- Reconocimiento del material ya mecanizado para optimizar los tiempos de trabajo.
- Compatible con geometrías en cualquier formato 2D o 3D en sólidos.
- Soporte de Eje C, Eje Y, Eje B.
- Soporte de sub-husillo, con gestión de la transferencia.

**FANUC.** Desarrollan y producen sistemas de CNC para máquinas herramienta y otras aplicaciones (FANUC America, 2015). Los sistemas de control de CNC gozan de una excelente reputación y son muy populares entre los fabricantes de máquinas y usuarios. Hasta la fecha, se han vendido más de 2.4 millones de sistemas de control de CNC en todo el mundo. La familia de productos de CNC comprende tanto sistemas de control para máquinas de nivel básico, como para aplicaciones complejas. Los sistemas de control de CNC de Fanuc

son conocidos en todo el mundo por su alta fiabilidad, precisión, velocidad y su sencillo manejo.

## **1.2 Aspectos mecánicos**

### **Características del aluminio para maquinado**

Las principales cualidades de este metal son: ligereza (1/3 respecto al acero), buenas características para su mecanizado en máquinas herramientas y óptima capacidad de disipación de calor (aproximadamente 3.5 veces superior a la del acero. En estado puro, sus propiedades físicas son:

- Peso específico,  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ;
- Módulo de elasticidad,  $6000 \text{ kg/mm}^2$ ;
- Temperatura de fusión,  $685 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

La carga de rotura es baja y varía según los tratamientos a que se somete el metal; en la mayoría de los casos no supera los  $25 \text{ kg/mm}^2$  en estado laminado o trefilado crudo, mientras que su límite de fluencia varía entre  $10$  y  $20 \text{ kg/mm}^2$ . En cambio, las aleaciones de aluminio pueden alcanzar resistencias mayores y, además, pueden mejorarse de modo considerable sus características mediante tratamientos térmicos adecuados.

Dado que el aluminio es un metal dúctil, el comportamiento en pruebas de tensión se presenta en la Figura 2.

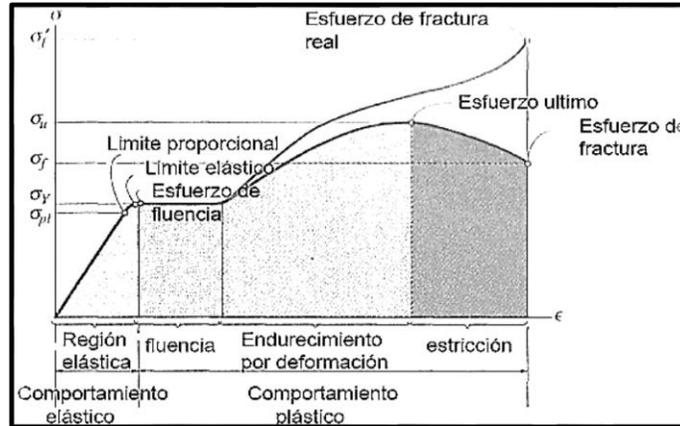


Figura 2. Gráfica de esfuerzo-deformación del aluminio a tensión.

Donde:

$\epsilon$ = Deformación

$\sigma$ =Esfuerzo

$\sigma_u$ = Esfuerzo Máximo

$\sigma_{\mu}$ = Limite de proporcionalidad

$\sigma_{\gamma}$ = Esfuerzo de fluencia

$\sigma_f$ = Fractura

## Características del acero para maquinado

El acero es una aleación de hierro, carbono (máximo 2.11% de carbono) y según los requerimientos, se le pueden adicionar variados elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su diferente utilización en la industria. Los principales elementos de aleación son: cromo, tungsteno, manganeso, níquel, vanadio, cobalto, molibdeno, cobre, azufre y fósforo. Los productos ferrosos con más de 2.11% de carbono se denominan fundiciones de hierro (Valencia, 1992). A continuación se enumeran algunas características generales del acero.

- **Alta resistencia mecánica:** Los aceros son materiales con alta resistencia mecánica a someterlos a esfuerzos de tracción y compresión y lo soportan por la contribución química que tienen. Por medio de los ensayos de laboratorio se determina la resistencia a tracción y a compresión evaluando su límite elástico y el esfuerzo de rotura.

- **Elasticidad:** La elasticidad de los aceros es muy alta, en un ensayo de tracción del acero al estirarse antes de llegar a su límite elástico vuelve a su condición original.
- **Soldabilidad:** Es un material que se puede unir por medio de soldadura y gracias a esto se pueden componer una serie de estructuras con piezas rectas.
- **Ductilidad:** Los aceros tienen una alta capacidad para trabajarlos, doblarlos y torcerlos.
- **Oxidación:** Los aceros tienen una alta capacidad de oxidarse si se exponen al aire y al agua simultáneamente, y se puede producir corrosión del material si se trata de agua salina.
- **Transmisor de calor y electricidad:** El acero es un alto transmisor de corriente y a su vez se debilita mucho a altas temperaturas, por lo que es preferible utilizar aceros al níquel o al aluminio, o tratar de protegerlos ventilándolos y evitar hacer fábricas de combustible o plásticos con este tipo de material. Estas dos desventajas son manejables teniendo en cuenta la utilización de los materiales y el mantenimiento que se les dé.

Su comportamiento a tensión o tracción se puede observar en la Figura 3.

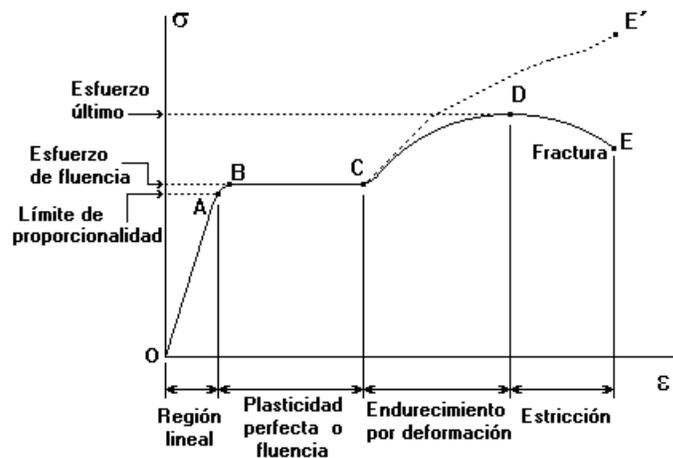


Figura 3. Comportamiento del acero a tensión.

Donde:

$\epsilon$ = Deformación

$\sigma$ =Esfuerzo

A=Límite de proporcionalidad

B= Punto de cedencia

C= Límite de la zona elástica

D= Esfuerzo máximo

E= Fractura (Punto de falla)

E'=Punto de falla real

## **Elementos de sujeción y centrado**

Los elementos de sujeción sirven para sostener la pieza en el lugar correcto y para transmitirle el movimiento que la haga girar a la velocidad requerida; estos son principalmente platos y perros de arrastre. Los primeros son conocidos también como *chucks* y tienen mordazas que se ajustan al tamaño de la pieza y son muy versátiles debido a eso; los segundos son unos dispositivos que tienen un tamaño fijo y transmiten el movimiento por medio de un extremo de estos, si bien la pieza es apretada por estos, el tamaño es fijo y no pueden soportar diferentes tipos de piezas.

## **Transmisión y transformación de movimiento**

Cuando se desea que el movimiento de salida sea de diferente dominio físico al de entrada se ocupan mecanismos de transformación de movimiento, los cuales toman uno y lo convierten a otro debido a particularidades que cada uno tiene. Estos tienen distintas características y cada uno ofrece ciertas ventajas y desventajas que deben ser consideradas cuando se diseña un sistema que requiera alguno.

La transmisión de movimiento, por su parte, permite la modificación equivalente a la entrada, sea de una magnitud igual o diferente, la cual se obtiene según el diseño del sistema que sea implementado; éste depende de la potencia y la velocidad que sean requeridos y los que sean dados por la fuente, es preciso, por lo tanto, saber las especificaciones mínimas que se requieran para poder diseñar el sistema de transmisión.

A continuación se presentarán dos opciones contempladas para la transmisión y transformación del movimiento del portaherramientas que maquinará la pieza en el torno.

### **Piñón-Cremallera**

Convierte el movimiento rotacional de un piñón en uno lineal continuo por parte de la cremallera, que no es más que un engrane que mueve una barra rígida dentada. Este mecanismo es reversible, es decir, el movimiento rectilíneo de la cremallera se puede convertir en un movimiento rotacional por parte del piñón. En el primer caso, el piñón al girar y estar engranado a la cremallera, empuja a ésta, provocando su desplazamiento lineal,

mientras que el otro recibe un impulso en la cremallera, haciendo girar de esta forma al piñón con el que hace contacto.

Los resultados que produce son precisos, constantes y sin deslizamientos, cualidades muy útiles en ciertas aplicaciones que requieren un movimiento rápido y con cierto rango de precisión a la salida; sin embargo, dependen de que el elemento motriz y el conducido tengan dientes de tamaño adecuado y cuenten con las especificaciones que doten al movimiento de la calidad y tolerancia requeridas. Por otra parte, la reversibilidad del mecanismo puede suponer una desventaja cuando a la salida hay una fuerza que se oponga al movimiento y lo pueda hacer frenar o incluso retroceder.

### **Tornillo de potencia**

A través de estos elementos de máquinas, denominados también tornillos de fuerza, es posible transformar un movimiento de rotación en un movimiento rectilíneo con el objeto de transmitir fuerza o potencia, derivándose de esto último el nombre de tornillos de potencia. Generalmente trabajan con un roce elevado, por lo que la eficiencia, el desgaste y el calentamiento son consideraciones importantes para su diseño, además de las consideraciones de resistencia mecánica, donde entra en juego el estado de esfuerzos involucrados como resultado del estado de cargas actuante en el punto crítico.

Los tipos de roscas utilizados frecuentemente en los tornillos de potencia son la cuadrada y la Acme. La rosca cuadrada es la que posee mayor rendimiento, aunque se prefiere comúnmente la rosca Acme, con un ángulo de  $29^\circ$ , por su buen ajuste; además tomando en consideración que la rosca cuadrada no está normalizada mientras que la Acme es de fácil construcción mediante todos los procedimientos existentes.

Un tornillo recirculante de bolas es un dispositivo mecánico para convertir el movimiento de rotación en movimiento lineal con poca fricción. El eje roscado proporciona un conducto espiral donde los rodamientos de bolas actúan como un tornillo de precisión. Además de ser capaz de aplicar o resistir altas cargas de empuje, reducen la fricción interna. Están hechas con mínimas tolerancias y por lo tanto aptos para su uso en situaciones en las que la alta precisión es necesaria.

Las velocidades que pueden alcanzar y la mínima vibración hacen de estos dispositivos, la mejor forma de transmitir movimiento; ya que se cuenta con la eficacia del tornillo de potencia combinado con la precisión de los husillos con bolas recirculantes.

## 1.3 Aspectos del control y la programación

### Microcontrolador.

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.

Algunos microcontroladores pueden utilizar palabras de cuatro bits y funcionan a velocidad de reloj con frecuencias tan bajas como 4 kHz, con un consumo de baja potencia. Por lo general, tienen la capacidad para mantener la funcionalidad a la espera de un evento como pulsar un botón o de otra interrupción, el consumo de energía durante el sueño (reloj del CPU (*Central Processing Unit*, unidad de procesamiento central) y los periféricos de la mayoría) puede ser sólo nV, lo que hace que muchos de ellos muy adecuados para aplicaciones con batería de larga duración. Otros microcontroladores pueden servir para roles de rendimiento crítico, donde sea necesario actuar más como un procesador digital de señales (*DSP Digital Signal Processor*), con velocidades de reloj y consumo de energía más altos.

Cuando es fabricado, el microcontrolador no contiene datos en la memoria ROM (*Read-Only Memory*, memoria sólo para lectura). Para que pueda controlar algún proceso es necesario generar o crear y luego grabar en la EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*, memoria eléctricamente borrable y programable sólo para lectura) o equivalente del microcontrolador algún programa, el cual puede ser escrito en lenguaje ensamblador u otro lenguaje para microcontroladores; sin embargo, para que el programa

pueda ser grabado en la memoria del microcontrolador, debe ser codificado en sistema numérico hexadecimal que es finalmente el sistema que hace trabajar al microcontrolador cuando éste es alimentado con el voltaje adecuado y asociado a dispositivos analógicos y discretos para su funcionamiento.

## **PWM**

*Pulse Width Modulation* o Modulación de Ancho de Pulso es el término utilizado para describir el uso de una señal digital para generar una analógica; esto es generalmente usado para el control de la carga de energía otorgada a un motor en control de velocidad. Una de las ventajas es que no se usan circuitos extras, y la señal no se desincronizará del tiempo, dado que está generada con base en un procesador de tiempo como un cristal de cuarzo.

El PWM funciona cambiando el nivel de voltaje promedio, y esto es hecho generando una señal de frecuencia constante donde el ancho de pulso de la misma es cambiado o modulado. Por ejemplo, para generar una señal de 2.5 V, cuando el voltaje de salida es de 5 V, simplemente se deja la señal encendida la mitad del tiempo, generando un promedio de la mitad de la energía.

## **Ciclo de Trabajo**

Es el porcentaje de tiempo que el pulso está en estado alto en comparación con el tiempo que está apagado. Así el ciclo de trabajo se define la anchura del pulso con el tiempo, o el ancho de pulso.

## **Computadora.**

Las computadoras poseen una amplia ventaja frente a otros dispositivos en lo que a memoria y flexibilidad se refiere, ya que cuentan con un disco duro y un sistema operativo que les permite programar muchos tipos de controladores que puedan satisfacer las necesidades del usuario. Se ha pensado utilizar un instrumento virtual para controlar el sistema, ya que éste tiene una interfaz modificable con base en los requerimientos, una programación compatible con varios protocolos de comunicación y una flexibilidad a cambios en él mismo.

La comunicación entre dos dispositivos requiere una transferencia de señal de una salida a una entrada, por lo que es necesario que haya un emisor y receptor de la señal para que el proceso de la comunicación completa tenga lugar. Las comunicaciones en serie y en paralelo son las dos formas de transferir datos a través de redes. Ambos sistemas tienen una forma única de funcionamiento, con diferencias entre los dos que van desde el modo de transmisión de señales para el nivel de conectividad que requieren.

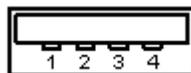
## Comunicación USB

El USB (*Universal Serial Bus*) (USB Implementers Forum, Inc., 2015) es un protocolo de comunicación serial entre entidades; hay varias versiones disponibles actualmente, la más común la 2.0. Desde el punto de vista del usuario, el bus USB se presenta en forma piramidal, donde el servidor se encuentra al inicio y los periféricos abajo y al exterior.

La ventaja principal de esta forma de comunicación es el hecho que un gran número de periféricos pueden estar conectados simultáneamente a un mismo servidor (la computadora normalmente) y que a todo momento es posible de desconectarlos y volverlos a conectar sin tener que reiniciar el controlador o servidor. (Fabien CHEVALIER, 2003)

### Periférico USB

El protocolo USB utiliza 4 cables distribuidos en conectores particulares; dos cables permiten la alimentación eléctrica de un periférico y dos sirven como vehículo de los datos. La especificación del protocolo impone una tensión máxima de 5 V entre los cables y una corriente de 500 mA.



*Figura 4. Conector tipo A.*



*Figura 5. Conector tipo B.*

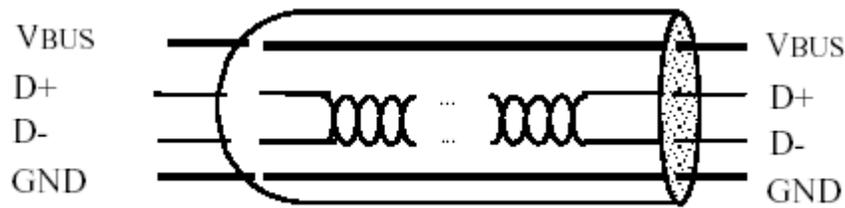


Figura 6. Conexiones USB.

## Protocolo USB

Contrariamente a las interfaces seriales, donde el formato en que los datos enviados no está definido, el protocolo USB está compuesto de diferentes pasos establecidos. Cada transacción de datos consiste en un paquete de cabecera (*Token*), uno de datos (*PayLoad*) y uno de estado (*HandShaking*); el servidor es el que inicia todos los intercambios de datos, por lo que el primer paquete es producido por éste para describir si la comunicación es de lectura o escritura y esto será la dirección del dispositivo y la terminación designada. El paquete siguiente es uno de datos que llevan la carga útil para finalizar después con un paquete de reconocimiento, que señala si los datos o la cabecera fueron recibidos correctamente, si la terminal está bloqueada o que no está disponible para recibir datos.

## Canales de comunicación

Mientras que un dispositivo envía y recibe datos por una sucesión de terminaciones, el cliente transfiere datos a través de canales de comunicación. Un canal de comunicación (*Pipe*) es una conexión lógica entre el servidor y el cliente; estos tienen una serie de parámetros que les son asociados, tales como la banda pasante, el tipo de transferencia, la dirección de flujo de datos y la extensión máxima de paquetes. Por ejemplo, el canal de comunicación predeterminado es un cana bidireccional compuesto de una terminal cero de entrada y de salida con un tipo de transferencia de comandos.

## Flujo de datos

Llamados en inglés *Stream Pipes*, no tienen un formato USB definido; es decir, se pueden enviar no importa qué tipo de datos y que se pueden reportar los datos de salidas del otro extremo. Los datos circulan secuencialmente y en una dirección predefinida, sea de entrada

o salida; el flujo de estos soportan los tipos de transferencia en bloque, isocrónicos y de interrupción. Tanto el servidor como el cliente pueden controlar el flujo de datos.

### **Canal de mensajes**

Conocidos como *Message Pipes*, tienen un formato definido, son controlados por el servidor e iniciados por una señal emitida por éste. Los datos son transferidos en una dirección deseada, por consecuencia los canales de mensajes permiten a los datos circular en ambas direcciones pero no pueden transferir más que los comandos emitidos.

## **Comunicación Serial**

La comunicación serial consiste en el envío de un bit de información de manera secuencial, esto es, un bit a la vez y a un ritmo acordado entre el emisor y el receptor.

Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*, código estándar americano para el intercambio de información). Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) tierra o referencia, (2) transmitir, (3) recibir. Debido a que la transmisión es asincrónica, es posible enviar datos por una línea mientras se reciben datos por otra. Existen otras líneas disponibles para realizar *handshaking*, o intercambio de pulsos de sincronización, pero no son requeridas. Las características más importantes de la comunicación serial son: velocidad de transmisión, bits de datos, bits de parada, y paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que todas las características sean iguales, es decir, que tengan sincronización.

### **Velocidad de Transmisión (*baud rate*)**

Indica el número de bits por segundo que se transfieren, y se mide en baudios (*bauds*). Por ejemplo, 300 baudios representan 300 bits por segundo. Cuando se hace referencia a los ciclos de reloj se está hablando de la velocidad de transmisión. Por ejemplo, si el protocolo hace una llamada a 4800 ciclos de reloj, entonces el reloj está corriendo a 4800 Hz, lo que significa que el puerto serial está muestreando las líneas de transmisión a 4800 Hz. Las velocidades de transmisión más comunes para las líneas telefónicas son de 14400, 28800, y 33600. Es posible tener velocidades más altas, pero se reduciría la distancia máxima posible

entre los dispositivos. Las altas velocidades se utilizan cuando los dispositivos se encuentran uno junto al otro, como es el caso de dispositivos GPIB (*General Purpose Interface Bus*, interfaz de bus de propósito general).

### **Bits de Datos**

Se refiere a la cantidad de bits en la transmisión. Cuando la computadora envía un paquete de información, el tamaño de ese paquete no necesariamente será de 8 bits. Las cantidades más comunes de bits por paquete son 5, 7 y 8 bits. El número de bits que se envía depende en el tipo de información que se transfiere. Por ejemplo, el ASCII estándar tiene un rango de 0 a 127, es decir, utiliza 7 bits; para ASCII extendido es de 0 a 255, lo que utiliza 8 bits. Si el tipo de datos que se está transfiriendo es texto simple (ASCII estándar), entonces es suficiente con utilizar 7 bits por paquete para la comunicación. Un paquete se refiere a una transferencia de byte, incluyendo los bits de inicio/parada, bits de datos, y paridad. Debido a que el número actual de bits depende en el protocolo que se seleccione, el término paquete se usa para referirse a todos los casos.

### **Bits de Parada**

Son bits usados para indicar el fin de la comunicación de un solo paquete. Los valores típicos son 1, 1.5 o 2 bits. Debido a la manera como se transfiere la información a través de las líneas de comunicación y que cada dispositivo tiene su propio reloj, es posible que los dos dispositivos no estén sincronizados. Por lo tanto, los bits de parada no sólo indican el fin de la transmisión sino además dan un margen de tolerancia para esa diferencia de los relojes. Mientras más bits de parada se usen, mayor será la tolerancia a la sincronía de los relojes, sin embargo la transmisión será más lenta.

### **Paridad**

Es una forma sencilla de verificar si hay errores en la transmisión serial. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible. Para paridad par e impar, el puerto serial fijará el bit de paridad (el último bit después de los bits de datos) a un valor para asegurarse que la transmisión tenga un número par o impar de bits en estado alto lógico. Por ejemplo, si la información a transmitir es 011 y la paridad es par, el bit de paridad sería 0 para mantener el número de bits en estado alto lógico como par. Si la paridad seleccionada fuera impar, entonces el bit de paridad sería

1, para tener 3 bits en estado alto lógico. La paridad marcada y espaciada en realidad no verifican el estado de los bits de datos; simplemente fija el bit de paridad en estado lógico alto para la marcada, y en estado lógico bajo para la espaciada. Esto permite al dispositivo receptor conocer de antemano el estado de un bit, lo que serviría para determinar si hay ruido que esté afectando de manera negativa la transmisión de los datos, o si los relojes de los dispositivos no están sincronizados.

## **Instrumento Virtual.**

Cada instrumento virtual consiste de dos partes: *software* y *hardware*. Este *software* se ejecutará en una computadora que tendrá alojado unos elementos *hardware* concretos, tarjetas de adquisición de datos (analógicos y digitales), tarjetas de interfaz con los buses de instrumentación y unos canales de control también analógicos y digitales. La instrumentación virtual y los sistemas mecatrónicos están sumamente ligados debido a la esencia de los segundos, ya que están basados en la unión armónica de la programación y la mecánica entre otras cosas. Esta sinergia involucra determinadamente a los instrumentos de medición y la correlación de los mismos con el software de desarrollo, dando por hecho entonces, que se tratan de instrumentos virtuales. La importancia radica en la imposibilidad de dar un control exacto a un sistema, sin la utilización de una programación dedicada al mismo, y por lo tanto, un medio de comunicación entre el sistema físico y el virtual. Básicamente, la única manera de controlar y verificar totalmente un mecanismo es por medio de sistemas de medición virtuales, los cuales analizan distintos datos y retroalimentan a un sistema; cosas que un instrumento tradicional no puede hacer sin ayuda humana.

## **1.4 Aspectos eléctricos-electrónicos**

### **Motores a pasos**

Los motores a pasos son muy utilizados en la actualidad para el desarrollo de mecanismos que requieren de una alta precisión. Este tipo de motores poseen cualidades muy importantes como lo es el moverse desde un paso hasta una secuencia interminable de pasos dependiendo de la cantidad de pulsos que se les aplique. Este paso puede ir desde pequeños movimientos de  $1.8^\circ$  hasta de  $90^\circ$ . Es por eso que este tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador (Motores a Pasos, 2015).

También poseen la habilidad de quedar en bloqueados en una posición si una o más de sus bobinas están energizada o bien totalmente libres si no existe corriente alguna circulando por ellas. Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente: unipolares y bipolares.

#### **Unipolares**

Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida dependiendo de su conexionado interno, que suelen ser comúnmente 4 cables por los cuales se reciben los pulsos que indican al motor la secuencia y duración de los pasos y los restantes sirven como alimentación al motor.

#### **Bipolares**

Este tipo de motores tienen generalmente cuatro cables de salida. Necesitan ciertas manipulaciones para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un

movimiento. Es necesario además un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), se necesitaran usar dos puentes H.

## **Motores de corriente alterna**

Los motores de CA (Corriente alterna) son denominados motores de inducción debido a que su funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas (Vandelvira, 2011).

En los motores eléctricos, la velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la velocidad de giro del campo magnético del estator, debido a la fricción del rotor en los cojinetes, rozamiento con el aire y a la carga acoplada al eje del rotor, por tal motivo se les conoce a estos motores con el nombre de motores asíncronos

## **Motores de corriente directa**

El motor de CD (Corriente Directa) es básicamente un transductor de par que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. El par desarrollado por el eje del motor es directamente proporcional al flujo en el campo y a la corriente en la armadura. Además del par desarrollado por el motor cuando el conductor se mueve en el campo magnético se genera un voltaje entre sus terminales Este voltaje es proporcional a la velocidad del eje, tiende a oponerse al flujo de la corriente (Quetzalcoatl, 2015)

De acuerdo con la construcción de la armadura, el motor de cd de imán permanente se puede descomponer en tres tipos de diseño de armadura:

- de núcleo de hierro
- de devanado superficial
- de bobina móvil.

### **Motores de corriente directa de imán permanente de núcleo de hierro**

El flujo magnético producido por el imán pasa a través de la estructura del rotor laminado que tiene ranuras. Los conductores de la armadura están localizados en las ranuras del rotor. Este tipo de motor está caracterizado por una inercia del motor relativamente alta (ya que la parte giratoria está formada por las bobinas de la armadura), una inductancia alta, bajo costo y alta confiabilidad.

### **Motor de corriente directa de devanado superficial**

En este tipo de motor, puesto que los conductores están proyectados en el entrehierro de aire que está entre el rotor y el campo de imán permanente, su campo tiene menor inductancia que el de estructura de núcleo de hierro.

### **Motor de corriente directa de bobina móvil**

Los motores de bobina móvil están diseñados para tener momentos de inercia muy bajos e inductancia de armadura también muy baja. Esto se logra al colocar los conductores de la armadura en el entrehierro entre la trayectoria de regreso del flujo estacionario y la estructura de imán permanente.

### **Motores de corriente directa sin escobillas.**

Los motores de cd sin escobillas difieren de los mencionados anteriormente en que emplean conmutación eléctrica (en lugar de mecánica) de la corriente de armadura. La configuración del motor de cd sin escobillas más comúnmente empleado, especialmente para aplicaciones de movimiento incremental, es una en la que el rotor consta de imanes y un soporte de hierro, en el que las bobinas conmutadas están localizadas en forma externa a las partes giratorias.



# Capítulo 2. Diseño conceptual

## 2.1 Planteamiento del problema

La necesidad específica que se desea solucionar con este trabajo terminal es el manufacturado de probetas para pruebas mecánicas tales como compresión, flexión y torsión. Éstas deben de cumplir ciertas normas oficiales para poder ser utilizadas en dichos experimentos.

El principal problema del proceso de elaboración de las éstas es que debe ser preciso y sistemático, es decir, el producto final debe de ser perfecto y tiene que repetirse tantas veces como experimentos deban ser hechos. Por lo que se derivan varios factores de esta problemática que deben considerarse, como el manejo experimentado de un torno, la rapidez de su maquinado, la constante repetitividad que pudiera originar fallos debido a un error humano, etc.

La segunda situación a tomar en cuenta es que, de utilizarse un torno CNC convencional, el gasto de tiempo en preparar el programa y en configurar la máquina es excesivo para la tarea que se dispondrá a hacer; de igual forma, la capacidad de la máquina es mucho mayor a la que se hará uso, por lo que resulta poco conveniente utilizarla para tal proceso. Además, de no tener un torno CNC, resultaría muy caro adquirir uno, y el gasto de energía y de espacio es muy grande para esta tarea.

Finalmente, se deben de tener en cuenta las especificaciones y requerimientos necesarias en el torno que se utilizaría, ya que es indispensable tener una exactitud suficiente para crear piezas para realizar las pruebas requeridas. Es por ello que, de igual manera, el proceso de maquinado debe ser minucioso para que el acabado de las probetas sea adecuado; de esta forma se garantizará la repetitividad de los resultados que se obtengan de las pruebas hechas a las distintas probetas que se hayan manufacturado, dando el aval de que todas serán, en cierto grado, iguales en calidad y forma.

## 2.2 Propuesta de solución

Por ello se propone diseñar e integrar un prototipo capaz de hacer este trabajo con una fidelidad suficiente para el objeto de estudio y que sea rápida con respecto a un torno manual. Además, no debe ocupar un espacio muy amplio ni ser caro, puesto que será especializada en una tarea y no en un proceso. Debe ser automatizada y controlada por un usuario que pueda procesar distintos tipos de probeta y de materiales, contando con una flexibilidad especial con los últimos, pues no todos se comportan similarmente y tienen requerimientos distintos.

La solución probable para el problema anterior es un torno por control numérico computarizado que tenga un tamaño adecuado y una fidelidad precisa. La mecatrónica, al ser una disciplina integradora y sinérgica, puede cubrir la necesidad anterior de manera contundente con esta propuesta debido a que une el maquinado tradicional con el control del mismo, la programación necesaria para hacerlo automático y lo innova mediante una estructura funcional; cabe aclarar que sólo de manera sistemática e incluyente se puede tratar este proyecto, ya que todos los componentes son necesarios y están relacionados completamente entre sí.

El torno propuesto debe maquinar piezas de aluminio y acero debido a que el primero es un material altamente utilizado por su maleabilidad, bajo peso y bajo costo respecto a otros metales como el titanio o el latón, el segundo por ser muy útil en la industria en general por sus características mecánicas y su gran variedad de aleaciones. Elegimos estos metales como parámetros de funcionamiento puesto que sus propiedades mecánicas son muy diferentes.

Es por eso que los motores deben de ser capaces de resistir las fuerzas que se opondrán al movimiento; la de los ejes del portaherramientas, las de corte, mientras que el eje rotacional deberá dar la potencia necesaria para que el desbaste sea correcto. La potencia es, por lo tanto, un factor muy importante, porque es indispensable tener suficiente para que el funcionamiento sea adecuado y ni el portaherramientas ni la estructura sufran esfuerzos innecesarios y resulten dañados; ésta será calculada para los materiales mencionados por medio de tablas preestablecidas de velocidades de corte recomendadas existentes y por

cálculos hechos con base en las fuerzas que estarán implicadas. Como resultado se escogerán los motores que moverán la máquina y se diseñará la estructura para resistir los esfuerzos.

Dado que esta máquina está dentro de un laboratorio, se busca que su tamaño sea el menor posible, pero al ser CNC necesita de una estructura que contenga todos los elementos suficientes, por lo que necesitará un tamaño mayor al área de trabajo, porque tendrá el motor de rotación y los ejes del portaherramientas rodeando a ésta. Sin embargo, aún no se tiene definida ninguna dimensión exacta, ya que no hay una estructura diseñada aún y se deben hacer los cálculos precisos sobre fuerzas y movilidad para diseñar una estructura conveniente al sistema.

## **2.3 Principios de solución**

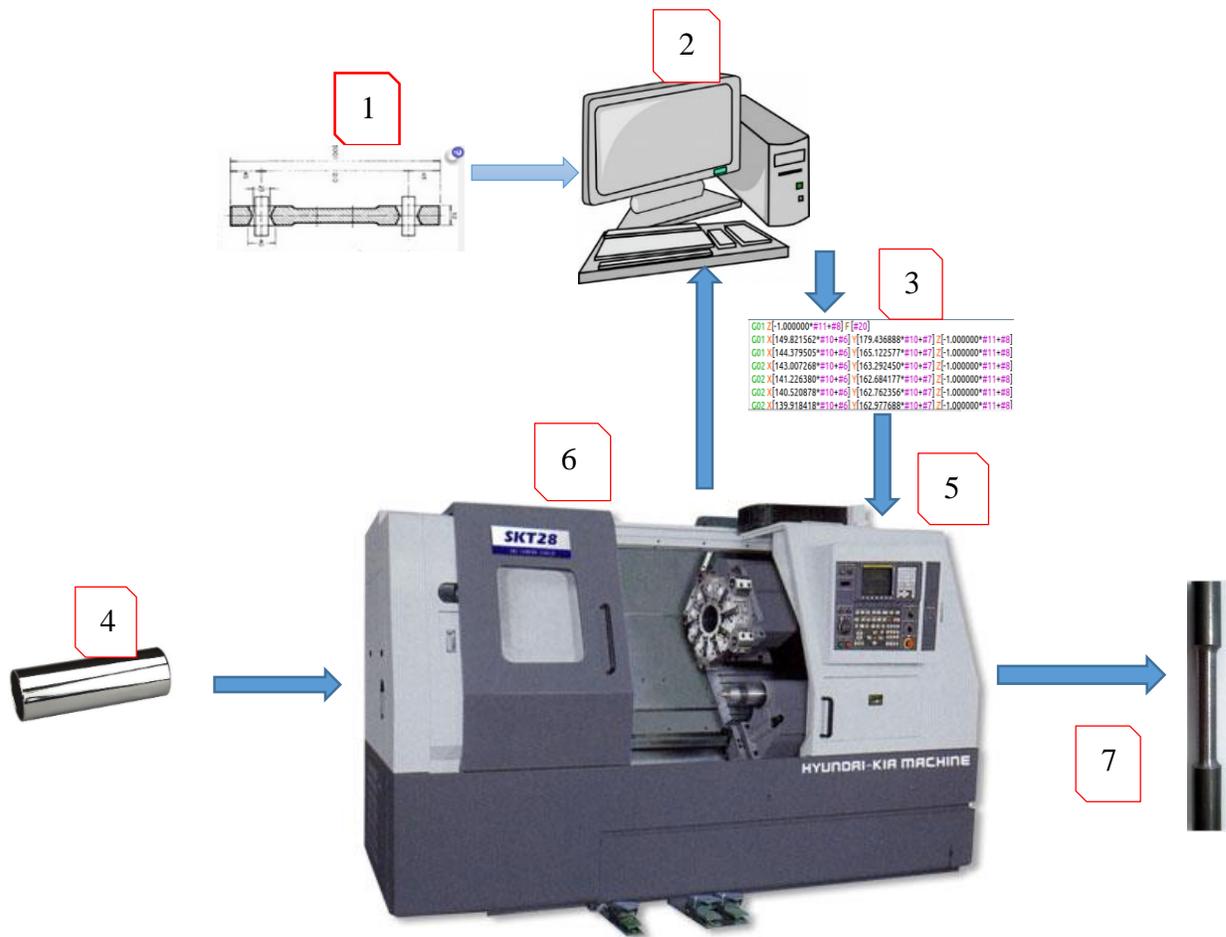
La sujeción de la pieza será con un perro de arrastre y un contrapunto del otro extremo para tener un movimiento exacto, en el que no haya vibraciones, y que esté totalmente recta para obtener un corte fiel. El portaherramientas estará arriba de la pieza en un eje delimitado que no exceda las dimensiones del área de trabajo para evitar accidentes por choques con la misma máquina. Dado que el avance de la herramienta debe ser adecuado para no tener errores en el maquinado, se ha considerado utilizar tornillos de potencia en los ejes que moverán los ejes del portaherramientas; esta elección fundamentada en la resistencia que este mecanismo presenta a las fuerzas que se oponen a su movimiento y su precisión al realizarlo. Sin embargo, todo esto será abordado de manera más específica en los apartados siguientes.

El control del sistema debe de hacerse con un dispositivo capaz de manejar los motores que guiarán el movimiento del portaherramientas y del motor que le dará un movimiento rotacional a la pieza. Este control debe de ser lo suficientemente robusto como para admitir una serie de pasos que generen una morfología previamente diseñada, en nuestro caso una probeta cilíndrica. Si bien se tienen medidas y formas exactas, el hecho de traducir éstas cuestiones a un lenguaje de programación exigen un análisis profundo de las opciones que se tienen y cuál es la que mejor se adapta al sistema, dado que la exigencia de éste es grande si se tienen en cuenta la precisión deseada, la flexibilidad y la facilidad de utilización.

Es por eso que se tiene que contemplar una interfaz gráfica que le brinde al usuario información del sistema accesible, por lo que debe de ser minuciosamente diseñada para ser mínima en opciones pero suficiente. De igual manera, las probetas que se diseñen deben de ser representativas, por lo que las instrucciones serían preestablecidas y no calculadas al momento. Además, la respuesta en tiempo del sistema es muy importante, ya que las señales deben de llegar lo más rápido posible a los motores para realizar movimientos precisos y que no haya errores que perjudiquen la fabricación de la pieza.

En cuanto a las señales de control, éstas serán enviadas desde una computadora que generará las instrucciones de movimiento de la máquina, la cual interpretará códigos numéricos. Es por eso que se diseñará una interfaz que transmita los códigos, al torno por medio de un protocolo de comunicación. Esta última será con base a los motores elegidos y los circuitos que se utilizarán, ya que las entradas y salidas de las señales darán los parámetros que se deberán contemplar y debido a las características de los datos se ha seleccionado el protocolo de comunicación USB.

Un esquema de operación generalizado se muestra en la Figura 7.



1. Se diseña o ingresa un dibujo en la PC.
2. La PC traduce el diseño a comandos.
3. Los datos son transmitidos por un *bus* al centro de control del prototipo.
4. El usuario ingresa manualmente una pieza de acero o aluminio.
5. Un módulo de control recibe los datos y los convierte en movimientos o acciones.
6. El prototipo comienza manufacturado con datos adquiridos de la PC.
7. El usuario puede retirar la pieza una vez terminado el proceso dentro del prototipo.

Figura 7. Esquema general de funcionamiento del prototipo.



## Capítulo 3. Diseño de materialización

El propósito del trabajo a desarrollar es el diseño y manufactura de un prototipo que machine barras de acero y aluminio para hacer probetas que sean utilizables para hacer pruebas de torsión, flexión o compresión. Este diseño será un torno CNC con un sistema de transmisión de movimiento óptimo en el portaherramientas y que tenga un motor que rote la pieza a una velocidad adecuada para la manufactura. La capacidad del torno será de 30cm de distancia entre puntos y 3cm de radio de volteo como dimensiones máximas, por lo que se contempla que éste medirá 1 m x 0.8 m aproximadamente. Durante el proyecto se diseñarán los algoritmos de comunicación y operación del prototipo; de igual manera se creará una estructura que adecúe los movimientos necesarios entre el portaherramientas y el torno. La máquina estará controlada desde una computadora que transmitirá las señales de control a los dispositivos electrónicos del CNC, éste interpretará una serie de instrucciones dadas por medio de un código numérico que será introducido por medio de una interfaz gráfica diseñada.

Las dimensiones tendrán que ser reducidas pero suficientes para poder maquinar las probetas utilizadas en las pruebas mecánicas; es decir, el espacio de trabajo será suficiente para construir, por lo menos, una probeta cuya longitud (L) estará entre 16 y 30 cm y un diámetro (D) de 1 a 10 cm, pero estas dimensiones (mostradas en la Figura 8) estarán sujetas a las especificaciones correspondientes al estudio y material del experimento a realizar, las cuales se observan en la Tabla 1 que muestra las medidas de pruebas de tensión ASTM (*American Society for Testing and Materials*, sociedad americana para las pruebas y los materiales).

Tabla 1. Dimensiones de probetas para pruebas mecánicas ASTM.

Probetas	Diámetro d		Longitud l	
	inch	mm	inch	mm
<b>Cortas</b>	$1 \frac{1}{8} \pm 0.01$	$30 \pm 0.01$	$1 \pm 0.01$	$25 \pm 1.0$
<b>Medianas</b>	$1 \frac{1}{2} \pm 0.01$	$13 \pm 0.01$	$1 \frac{1}{2} \pm 0.01$	$38 \pm 1.0$
	$0.80 \pm 0.01$	$20 \pm 0.01$	$2 \frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$	$60 \pm 3.0$
	$1 \pm 0.01$	$25 \pm 0.01$	$3 \pm \frac{1}{8}$	$75 \pm 3.0$
	$1 \frac{1}{8} \pm 0.01$	$30 \pm 0.01$	$3 \frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$	$85 \pm 3.0$
<b>largas</b>	$0.80 \pm 0.01$	$20 \pm 0.01$	$6 \frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$	$160 \pm 3.0$
	$1 \frac{1}{4} \pm 0.01$	$32 \pm 0.01$	$12 \frac{1}{2} \text{ min}$	$320 \text{ min}$

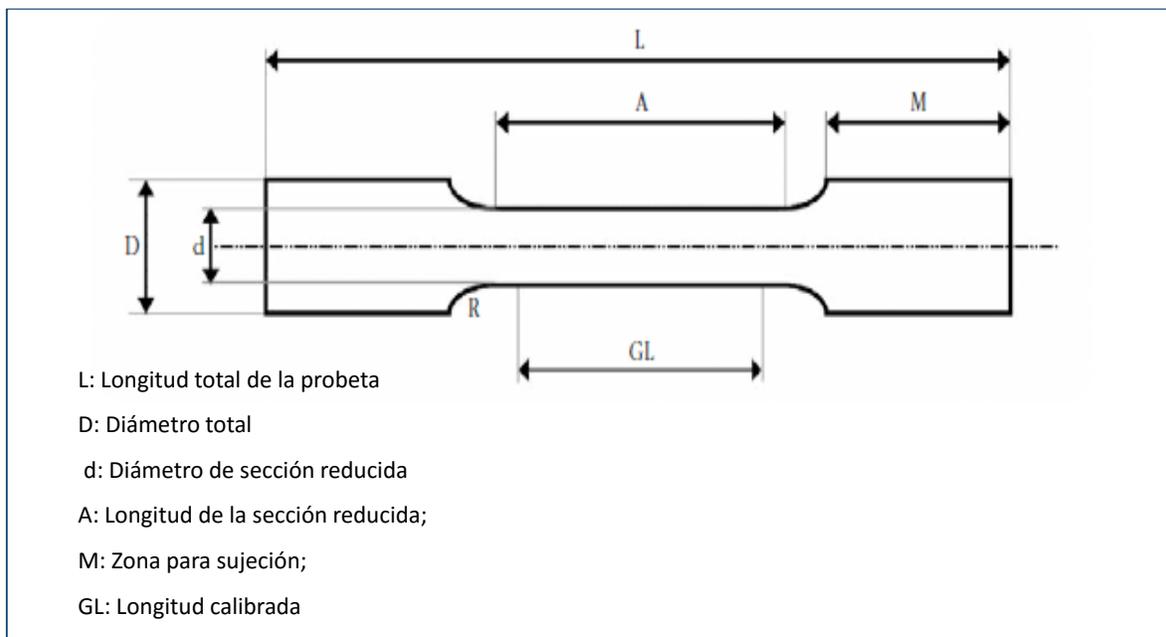


Figura 8. Medidas de una probeta cilíndrica.

En el protocolo del proyecto se especificó que el prototipo podría maquinar piezas de aluminio y acero, en la Tabla 2 se muestran algunas velocidades de maquinado para algunos materiales en el sistema internacional y el sistema americano.

Tabla 2. Velocidades de manufacturado para algunos metales.

**Refrentado, Torneado, Rectificación**

Material	Desbastado		Acabado		Roscado	
	Pies/min	m/min	Pies/min	m/min	Pies/min	m/min
Acero de máquina	90	27	100	30	35	11
Acero herramienta	70	21	90	27	30	9
Hierro fundido	60	18	80	24	25	8
Bronce	90	27	100	30	25	8
Aluminio	200	61	300	93	60	18

(Ingeniería de Sistemas Educativos, 2014)

Como podemos ver en la Tabla 2, la velocidad mayor es la de maquinado de aluminio (situado en la parte inferior), y la velocidad menor es la de maquinado de hierro fundido (en la antepenúltima fila), entonces los parámetros de velocidad de la maquina estarán situados entre 18 y 61 m/min para lograr maquinar ambos materiales.

Para calcular las fuerzas implicadas en el proceso de corte o desbastado del material durante la operación del torno, se hace uso de las siguientes tablas de especificaciones y fórmulas de materiales para dicho proceso. Se toma como referencia al acero, dado que sus características son de mayor magnitud comparándolas con las del aluminio.

$$N = \frac{ap * f * vc * K}{60 * 10^3 * \eta} \text{ (kW)}$$

Donde:

$N$  (kW)= La potencia necesaria

$f$  (mm/rev)=Cantidad de alimentación de cada extensión

$K$  (N/mm<sup>2</sup>)=Fuerza de corte

$ap$  (mm)= profundidad del corte

$vc$  (m/min)= velocidad de corte

$\eta$  = valor de eficiencia de la máquina

Tabla 3. Fuerzas de corte.

<i>Material de pieza</i>	<b>Las fuerzas de corte de varias capacidades de alimentación K (N/mm<sup>2</sup>)</b>				
	0.1 mm/rev	0.2 mm/rev	0.3 mm/rev	0.4 mm/rev	0.5 mm/rev
Acero dulce	3610	3100	2720	2500	2280
Acero medio duro	<b>3080</b>	2700	2570	2450	2300
Acero duro	4050	3600	3250	2950	2640

(LZQ, 2008)

Como se puede observar en la Tabla 3, se tiene que hacer una operación para calcular la potencia del motor que moverá a la pieza seleccionando una fuerza de 3100 N/mm<sup>2</sup>. Y sustituyendo en la ecuación 1 obtenemos una potencia para el motor con una magnitud 600W, es decir, 0.7 HP.

En este proyecto se ha determinado utilizar perros de arrastre debido a su bajo precio comparado con el de un mandril de tres mordazas, su tamaño y peso. Dado que el torno maquinará probetas de cortas dimensiones, y éstas ya están definidas por normas y son invariables, se decidió que los perros cumplirán satisfactoriamente con la tarea que les es

dada; además su tamaño y peso dan una ventaja grande, ya que se pretende crear un torno pequeño, compacto, que no pese demasiado y que pueda maquinarse rápidamente sin tener que gastar tiempo en la colocación de la pieza y en su centrado, lo cual es enormemente fácil si se utilizan estos elementos.

Hablando del diseño mecánico que se hizo, estos deben de transmitir la velocidad y la potencia necesaria para que la pieza sea maquinada de forma suave y eficaz, sin que haya vibraciones ni interrupciones que causen un fallo en el sistema, por lo que deben seleccionarse de un material adecuado, de una forma correcta y que se ajusten perfectamente a la probeta que sujetarán. De esa forma queda decidido que el mecanismo que guíe el movimiento sea un disco plano conectado al motor que dará el movimiento, el cual sostendrá el perro de arrastre fuertemente, que a su vez, sostendrá la pieza; esto dará un centrado perfecto y no tendrá perturbaciones debido a lo rígido del sistema y su robustez en cuanto materiales y diseño se habla.

Se decidió finalmente escoger el tornillo de potencia con bolas recirculantes como transmisor de movimiento debido a su alta precisión, dotada principalmente por los pequeños movimientos lineales que resultan a un impulso rotatorio, y por su resistencia a el retroceso y reducción de movimiento, además de que la velocidad necesaria a la salida es mínima, con lo cual se determina que es el mecanismo que se adapta de mejor manera a nuestro sistema.

Para el diseño del sistema de control, se han contemplado solamente dos opciones, hacerlo a través de un microcontrolador y utilizar una interfaz gráfica a partir de una pantalla con botones o por medio de una computadora, la cual mostrará un programa que ejecutará las instrucciones recibidas. Es importante que cada elemento dispone de un protocolo de comunicación diferente y que las señales son procesadas con ciertas diferencias; aunándolo a la posibilidad de memoria en ambos y la lógica que se debe usar en cada uno.

En cuanto a la comunicación con la computadora, se ha hecho una comparativa entre los dos protocolos mencionados en el marco teórico; con lo que se ha sacado la siguiente conclusión:

Los dispositivos de comunicación en paralelo son más rápidas que sus homólogos de serie. La comunicación en serie tiene un solo puerto con un alambre, mientras que un conector de puerto paralelo está generalmente conectado a ocho alambres. Un puerto serie, por lo tanto,

requiere menos inversión para la compra de cables en comparación con la comunicación en paralelo. En términos de espacio, la comunicación paralela requiere más espacio para dar cabida a los cables, mientras que la comunicación serial utiliza un espacio mínimo para su conector único.

Para el movimiento de los ejes de portaherramientas se ha decidido utilizar motores a pasos, debido a que dada la transformación del movimiento rotacional a lineal por medio del tornillo de potencia se obtiene una precisión a la salida mucho mayor a la de entrada. En cuanto al movimiento del perro de arrastre se tienen como opciones un motor de corriente directa con un buen torque o un motor de corriente alterna que cumpla con los requerimientos pedidos.

A continuación se muestra la estructura que compondrá al torno, junto con el motor, contrapunto y portaherramientas. La Figura 9 muestra sólo la estructura en general, mientras que en la Figura 10 se aprecian los demás elementos.

Como se observa en las figuras, el diseño de la estructura es en forma vertical, ya que se busca minimizar el área que la máquina ocupe, logrando tener la misma funcionalidad pero con una disposición diferente a la convencional.



*Figura 9. Estructura del prototipo.*



*Figura 10. Diseño conceptual del prototipo.*

# Capítulo 4. Diseño de detalle

## 4.1 Diseño mecánico

### Estructura

En cuanto al aspecto mecánico, se ha decidido realizar el proyecto con una estructura hecha a partir de tubos de acero de perfil cuadrado de 19.05 milímetros de ancho y calibre 16, dado que tiene las características mecánicas deseadas; por su forma cerrada y bajo peso presentan un mejor comportamiento a esfuerzos de torsión y resistencia al pandeo (Figura 11).



Figura 11. Perfil cuadrado de acero inoxidable.

En cuanto al diseño, será de forma vertical, lo cual ayudará a reducir el espacio que ocupará la máquina, es decir, dotará al torno de dimensiones reducidas en el área de base pero con el mismo volumen para trabajar la pieza; la torreta que sostiene al portaherramientas se encontrará por encima de la pieza en revolución, y subirá, bajará y se desplazará por el eje longitudinal de la pieza. Por otra parte, se ha decidido que toda la estructura esté compuesta por rectángulos compactos, lo cual le dará buena estabilidad y los espacios libres servirán para darle ventilación y serán útiles para manipular cualquier pieza en caso de presentarse un problema.

Se ha decidido que irá anclada en una placa igualmente de acero inoxidable, lo cual ayudará a que no presente ciertos problemas, tales como fuerzas que la hagan separarse y a que no soporte todas las vibraciones, dotando a la estructura de una robustez adicional. Además, la materia prima que se desprenda de la pieza y caiga podrá ser recolectada fácilmente en la placa.

## **Transmisión de movimiento**

Se han elegido los tornillos de potencia por bolas recirculantes que se desplazan a lo largo de perfiles de acero inoxidable conocidos como guías deslizables, como medio transmisor y transformador de movimiento en ambos ejes de la torreta, esto a razón de su excelente precisión y la continuidad que dan en el movimiento prácticamente sin fricción. Se han analizado sus características tanto comerciales como de diseño y se ha obtenido la siguiente conclusión. Los tornillos de bolas tienen una capacidad de carga muy elevada, más elevada que un tornillo convencional del mismo diámetro, y no sufren las características de adhesión y deslizamiento de las uniones deslizantes. La baja fricción de los tornillos de bolas hace que puedan ser impulsados hacia ambas direcciones y, por lo tanto, no son autobloqueantes (se refiere a la situación en la cual el tornillo no podrá ser girado por la aplicación de cualquier magnitud de fuerza que se aplique axialmente).

En la torreta, se tendrá un tornillo que impulsará un pequeño bloque de aluminio en forma “T” que sirve de base para sostener un eje donde irá el portaherramientas; tanto en la parte superior como inferior de la torreta se encontrarán dos placas base de aluminio que servirán de soporte para el tornillo de potencia, además de sostener dos ejes de acero inoxidable circulares que sirven como guía para la transmisión.

En cuanto al eje de transmisión en “x” de la torreta, se utiliza el mismo principio que se describió anteriormente, las placas base de transmisión en ese eje sujetan igualmente al tornillo de potencia y dos ejes circulares de acero inoxidable, sólo que ahora el tornillo moverá a la estructura ya mencionada por completo, ésta sujeta por unas piezas atornilladas y atravesadas por las guías y el tornillo en una sección circular con una mínima tolerancia

para que no haya fricción pero tampoco un torque que haga se atoren al deslizarse por los ejes. Al estar en una formación triangular soportan de una manera uniforme el peso de la estructura, ya que la base del mismo nivela la masa equilibradamente, mientras que la fuerza que la mueve se encuentra en la parte superior, por lo que no habría problemas con el peso en cuanto a fricción o torque.

En ambos mecanismos el movimiento circular será proporcionado por motores a pasos, esto a razón de que el desplazamiento será muy pequeño por cada paso que sea dado, lo cual dotará al sistema de una precisión alta y de un movimiento lento y ligero, algo muy necesario y buscado debido a que el terminado de la pieza depende de la velocidad del rotor y la fluidez con la que el portaherramientas maquina la pieza.

Los tornillos de potencia estarán sostenidos por rodamientos que deberán soportar su peso y tener un amplio tiempo de vida. Gracias al *software* “SolidWorks” se obtuvo que la masa de la torreta es de 3.72896 Kg, siendo ésta la pieza más pesada que soportaría un tornillo, por lo que en base a eso se obtiene que la carga máxima es de 36.58 N. Revisando tablas de características y especificaciones de los tornillos de potencia por bolas recirculantes se encontraron que son buenos para transportar cargas grandes, tienen una muy buena velocidad de respuesta y no hacen mucho ruido. (NSK Ltd., 2015)

Se eligió la empresa “NSK” debido a que ofrecen una gama amplia de productos de precisión para máquinas como la que queremos construir; se buscó por tablas y en las diferentes listas de productos que ofrecían y se encontró un tornillo que se adaptó a nuestro proyecto, principalmente por sus dimensiones y características intrínsecas. El modelo elegido es “EM4020-6E” cuyas características se presentan en el Anexo 1.

En cuanto al rodamiento, se ha partido con el diámetro del tornillo que sostendrá; igualmente se ha decidido seleccionar una oferta de la empresa anterior, por lo que revisando las características de los modelos existentes, se ha elegido el “1208”. Las especificaciones dicen que es un rodamiento de bolas autoalineable, lo cual indica que, a pesar de tener una capacidad de carga baja, se comporta bastante bien inclusive si se produjera un movimiento en el eje; esto no es preocupante para nosotros dado que sus características rebasan nuestros requerimientos, siendo estas presentadas en la Tabla 4 e ilustradas en la Figura 12.

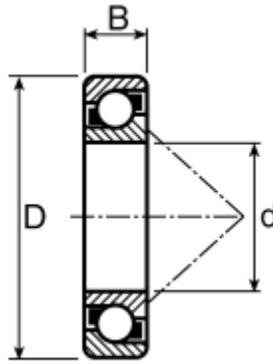


Figura 12. Medidas básicas de un rodamiento.

Tabla 4. Características del rodamiento 1208.

Tipo de rodamiento	Número de rodamiento	Dimensiones mm			Índice de carga básica		Limitador de velocidad ( $\text{min}^{-1}$ )	
		d	D	B	$C_r$	$C_{or}$	Grasa	Aceite
Rodamientos de bolas autoalineables	1208	40	80	18	19300	6500	7500	9000

## 4.2 Diseño eléctrico-electrónico

### Selección de motores

Para la selección de motores es importante tener una precisión buena en el movimiento del portaherramientas, para lo cual no era necesario tener una velocidad alta en éste. Para lo cual se tenían varias opciones, entre las cuales estaban motores de corriente directa y motores a pasos, los primeros por su estabilidad en movimiento y fluidez; sin embargo, se optó por la segunda opción, dado que la velocidad no importa mucho en contraposición con la controlabilidad y la capacidad de respuesta, es decir, si bien su movimiento no es tan fluido y rápido como un motor de corriente directa, los motores a pasos presentan un pequeño giro

controlado y exacto en su salida con un pulso que les sea aplicado, lo cual ayudará a desplazarse muy pequeñas distancias lineales sin temor a tener un error grande en este valor por un mal funcionamiento electrónico accidental, además proporcionarán robustez en las tolerancias manejadas.

Se han hecho los cálculos del torque necesario para mover el tornillo de potencia considerando el peso de la torreta y las características del tornillo en sí.

$$\tau = F \cdot \left( \frac{h}{2\pi \cdot \eta} + r \cdot \mu \right)$$

$\tau$  = Torque     $F$  = Fuerza     $h$  = Paso del tornillo     $\eta$  = Eficiencia del tonillo  
 $\mu$  = Fricción     $r$  = Radio del tornillo

$F = 3.72896$  (9.81)     $h = 0.02$      $\eta = 0.9$   
 $\mu = 0.0015$      $r = 0.02$

$\tau = 0.131895097$  N m

Considerando el torque calculado se selecciona un motor a pasos capaz de otorgarlo, además de observar los pasos a los que opera, ya que esto determina el ángulo mínimo de movimiento y por ende precisión. Por medio de una selección entre diferentes motores con características similares, se optó por un motor “NEMA 23” modelo “PH265-01” cuyas características se enuncian en la Tabla 5 y comportamiento se observa en la Figura 13.

*Tabla 5. Características motor a pasos.*

<b>Oriental Motor U.S.A. Corp. - Standard Motors - NEMA 23</b>					
<b>Modelo</b>	<b>Torque [N m]</b>	<b>Corriente [A]</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Ángulo [°]</b>	<b>Pasos</b>
PH265-01	0.411688	0.85	6	1.8	200

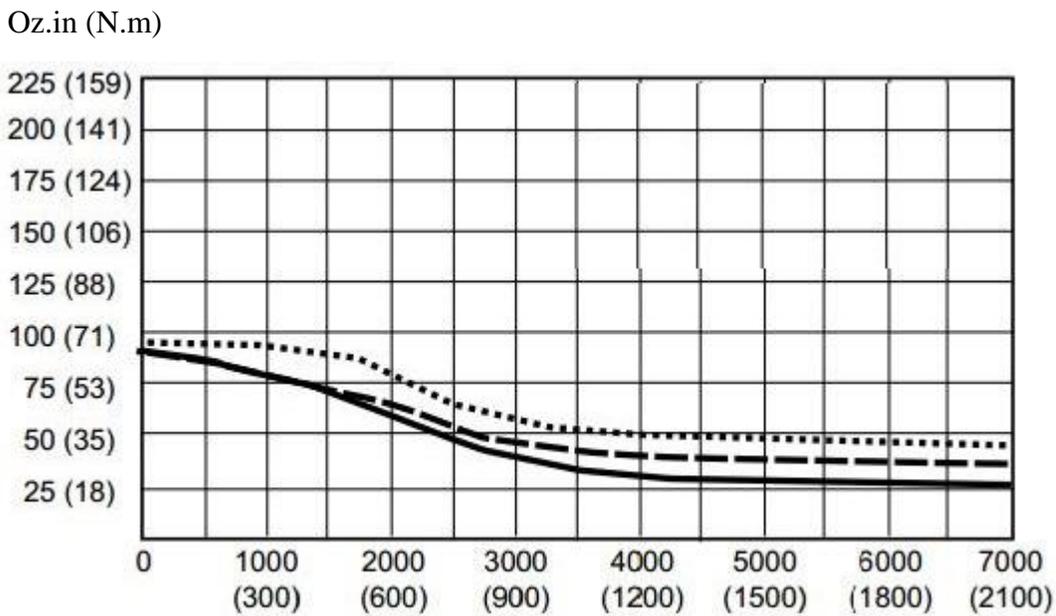


Figura 13. Comportamiento del Par versus la Velocidad en RPM de un motor a pasos.

De acuerdo con las características que se muestran se determinan los siguientes datos:

- Por cada paso, el portaherramientas se moverá 0.1 mm en la dirección del eje en que actúe.
- El torque que proporciona es 3.121331 veces mayor al requerido.
- Dadas las bajas velocidades que se manejarán en el dispositivo, la pérdida de torque por aumento en los pasos por segundo no es significativo.

En cuanto al motor para el giro de la pieza se consideró un motor de corriente directa que proporcionara la velocidad y el torque suficiente para maquinar la pieza y darle un acabado aceptable. Para seleccionarlo se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{1000 Vc}{\pi \cdot d}$$

$\omega$  = velocidad angular [rpm]     $Vc$  = Velocidad de corte [mm/min]     $d$  = diámetro pieza [mm]

Y si consideramos la pieza más grande y con mayor velocidad de corte a maquinar propuesta, que es de 100 mm y 61 mm/min, la velocidad sería de 194.2 rpm.

Mientras que el torque se calcula como:

$$\tau = F \cdot r$$

$\tau$  = Torque     $F$  = Fuerza     $r$  = distancia buril a motor  
 $F = 3080 \text{ N}$      $r = 0.31623 \text{ m}$

$$\tau = 973.9815 \text{ N m}$$

Teniendo entonces estos datos, se procedió a sacar la potencia necesaria, cuyo valor se obtiene a partir de multiplicar el torque por la velocidad angular, lo cual resulta en una potencia de 2.5 HP.

Revisando motores disponibles con tales características y que se adapten a nuestro presupuesto, se ha elegido el siguiente.

United Technologies Automotive  
Part # 68616  
2.5HP @ 130 VDC  
A 17.2  
RPM 7099

Como puede observarse, el motor cumple con las especificaciones necesarias y se ajusta fácilmente a nuestro modelo. Dado que es de corriente directa se podrá controlar su velocidad fácilmente para poder variarla dependiendo del material.

## Selección del microcontrolador

Para nuestro caso particular se consideró que el microcontrolador ATmega16 es de las mejores opciones, ya que puede operar con 5.5 Volts, puede manejar diversos protocolos de comunicación como lo son el SPI (*Serial Peripheral Interface*, interface de periférico serial), I<sup>2</sup>C (*IIC Inter Integrated Circuit*, circuito inter integrado), JTAG (Joint Test Action Group, grupo de acción para pruebas de unión), etc. Cuenta con 4 canales de PWM y puede recibir señales analógicas.

## Control para motores

Para la etapa de control de los motores a pasos se eligió el A4988 que es con controlador de fácil implementación y múltiples configuraciones disponibles puede operar motores a pasos bipolares con un resolución de paso completo, medio paso, 1/4, 1/8 y 1/16 de paso, con una capacidad de manejo de hasta 35 V a 2 A para el motor. El controlador puede operar entre 3.3 y 5 V y es en general un dispositivo con amplios márgenes de trabajo muy adecuados para nuestro proyecto (Tabla 6).

Tabla 6. Características del controlador.

Característica	Símbolo	Rango	Unidades
Carga para el motor	V <sub>BB</sub>	35	V
Corriente de salida	I <sub>OUT</sub>	±2	A
Voltaje de entrada	V <sub>IN</sub>	-0.3 a 5.5	V
Voltaje de alimentación	V <sub>DD</sub>	-0.3 a 5.5	V
Voltaje de salida para motores		-2.0 a 37	V

<b>Voltaje de referencia</b>	$V_{REF}$	5.5	V
<b>Temperatura ambiente</b>	$T_A$	-20 a 85	°C
<b>Temperatura máxima</b>	$T_J$	150	°C
<b>Temperatura almacenada</b>	$T_{STG}$	-55 a 150	°C

En cuanto a la temperatura ambiente, no es la máxima que puede soportar pero si es la máxima potencia útil con la que puede trabajar (Figura 14) de ahí la gran diferencia entre temperatura máxima y temperatura ambiente.

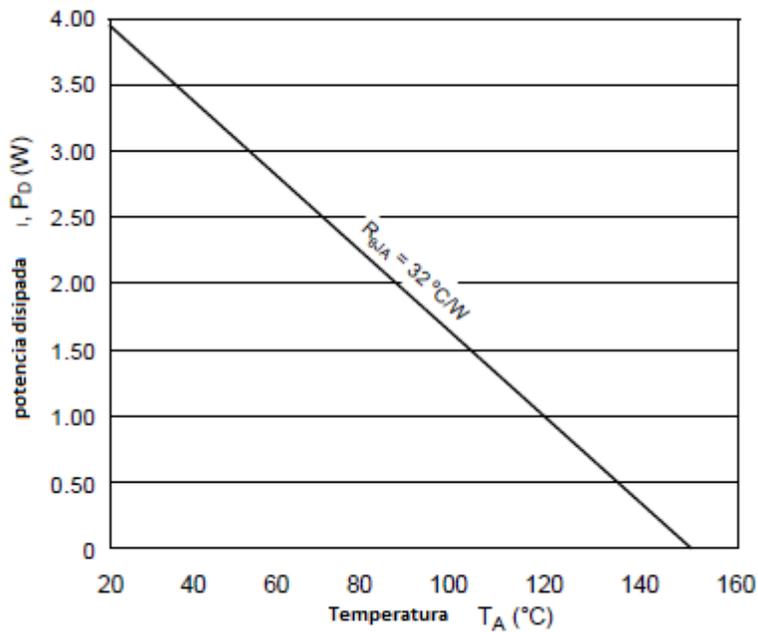
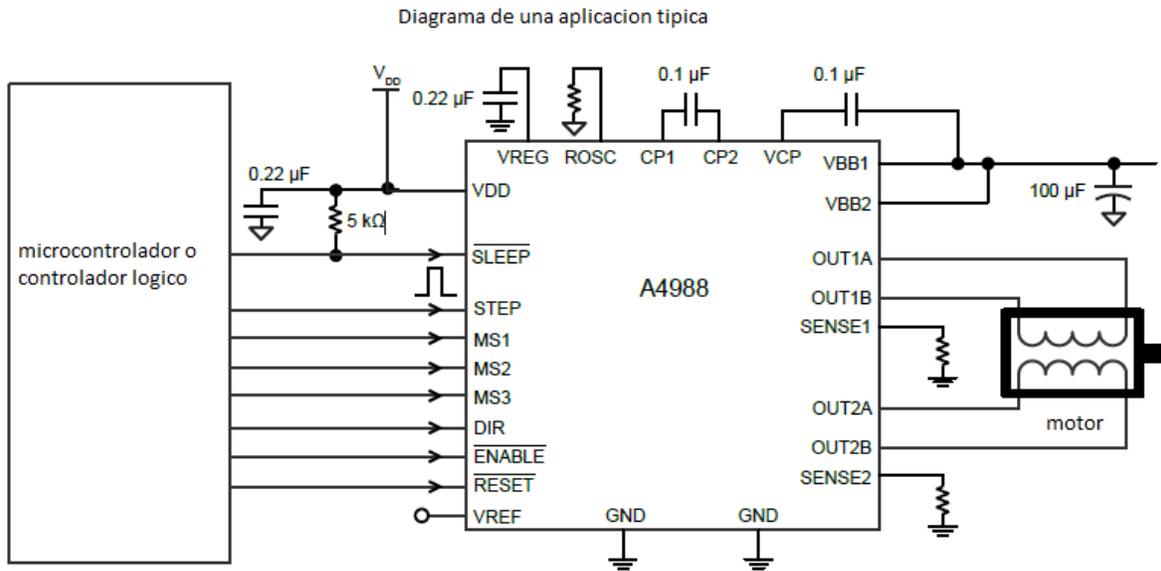


Figura 14. Potencia disipada versus Temperatura del circuito A4988.

Este dispositivo está protegido contra sobre cargas de corriente, se puede controlar la corriente mediante un potenciómetro externo, y adicionalmente cuenta con un sistema de apagado automático en caso de sobrecarga.

En la Figura 15 se muestra una de las conexiones típicas del controlador.



*Figura 15. Conexiones del controlador A4988.*

En el diagrama se puede apreciar las conexiones hacia MS1, MS2, y MS3 estos indican la resolución del paso que se requiere (Tabla 7).

*Tabla 7. Resoluciones de paso.*

MS1	MS2	MS3	Resolución del paso
L	L	L	Paso completo
H	L	L	Medio paso
L	H	L	Cuarto de paso
H	H	L	Octavo de paso
H	H	H	Dieciseisava de paso

Para una mejor apreciación de las conexiones se puede observar en la Figura 16 el diagrama de conexión de todo el circuito integrado, donde VMOT es para la alimentación del motor y STEP y DIR son enviados mediante el microcontrolador para regular la frecuencia de los pasos y la dirección, las entradas MS se conectan según el paso requerido.

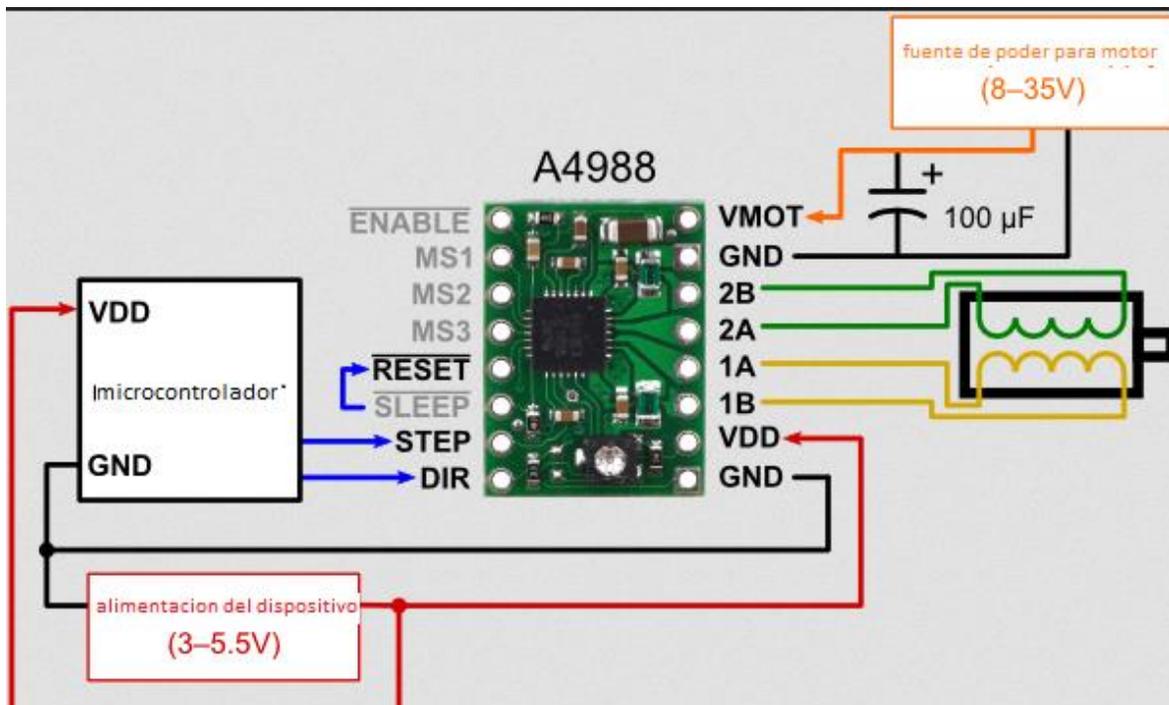


Figura 16. Conexiones del circuito A4988.

### 4.3 Diseño del control y la programación

El control del sistema se lleva a cabo en una computadora que envíe las señales correspondientes a los controladores de los distintos motores, éstas son controladas a su vez por un software que las manipula de acuerdo a la pieza que se está maquinando. Ya que los motores de los ejes son a pasos, y que son manejados por un chip que recibe un pulso cada que deba dar un paso, las señales tienen que estar controladas de acuerdo a la velocidad de respuesta que se quiera dar. Si bien, el sistema es en lazo abierto, se ha propuesto colocar

sensores en los finales de carrera de los ejes para evitar problemas con el torno y asegurar su buen funcionamiento, también colocaría el portaherramientas en la posición cero fácilmente.

Por otra parte, se ha decidido crear un programa preestablecido para cada probeta que se quiera crear, independiente de un dibujo CAD; con esto se ahorrará el paso del dibujo a las instrucciones correspondientes del torno, siendo utilizados comandos predefinidos que guíen el portaherramientas según las trayectorias deseadas.

En cuanto a la programación, se ha decidido utilizar *LabView* para la interfaz gráfica y adquisición de señales, ya que ofrece importantes herramientas de procesamiento de señales y brinda una interfaz de fácil empleo para el usuario. El programa a realizar tendrá que controlar los movimientos de los motores que controlarán los ejes y el movimiento de la pieza, además de seudomonitorear el estado de construcción de la pieza, basándose en tiempos y comandos utilizados, ya que como se dijo anteriormente, el sistema no tendrá retroalimentación en este sentido. Sin embargo, la precisión tanto del *software* como del *hardware* ofrecerán una confiabilidad en el torno; esto a razón de que los movimientos serán controlados muy minuciosamente y las velocidades serán precisas, además de tener los tiempos y los pasos muy bien contemplados.

La interfaz será básicamente una selección de pieza, botones de inicio y paro y el estado de la máquina. Esto dotará al sistema de la simpleza de uso que se requiere, eliminando tareas inútiles y creando un ambiente claro para el usuario. Para esto se tuvo en cuenta que el sistema será utilizado por doctores para la investigación, por lo que la tarea de maquinar una probeta no debe de absorberles tiempo ni debe de ser complicada, por lo que una comunicación humano-máquina clara es indispensable.

# Capítulo 5. Rediseño

Después de investigar a fondo y cotizar materiales, se realizó un rediseño del prototipo a partir de los hallazgos obtenidos y las recomendaciones recibidas. Las partes primordiales que se han modificado son el motor de corriente directa, el contrapunto y su base, el perro de arrastre y el microcontrolador.

## 5.1 Diseño electrónico

Comenzando con el microcontrolador, se decidió cambiar por uno con mayor compatibilidad con el software a utilizar (LabView); este cambio fue pasar de un AT Mega 16 de ATMEL a un PIC 18F4550 de Microchip, el cual cuenta con una interfaz para USB 2.0 de velocidad completa (12 Mbit/s), resistencias de *Pull Up* internas, rendimiento de 48 MHz, puerto de transmisión, baja potencia entre otras características. (Microchip Technology Inc., 2014)

Con este cambio se logró implementar una conexión vía USB a la computadora, teniendo una comunicación rápida y más sencilla de utilizar; además de omitir aspectos como los PWM disponibles, comunicación serial, etc. Por lo que se crea una forma más fácil de operar y de conectar con el sistema, al ser utilizado el chip con una configuración de tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

Las conexiones que se utilizarán son solamente de “D+” y “D-” ya que el alimentación se obtiene de una fuente externa que energizará a los controladores de los motores a pasos. Se utilizarán los pines de salida del microcontrolador para los *drivers* anteriores y el motor de corriente directa, las entradas sólo serán para los sensores de fin de carrera de la estructura para frenar todo, sea en paro de emergencia o para determinar el cero absoluto. Esto se ilustra en la Figura 17, donde del pin 33 al 40 son las salidas y del 27 al 30 y del 18 al 24 son los de entrada; sin embargo sólo se utilizarán algunos.

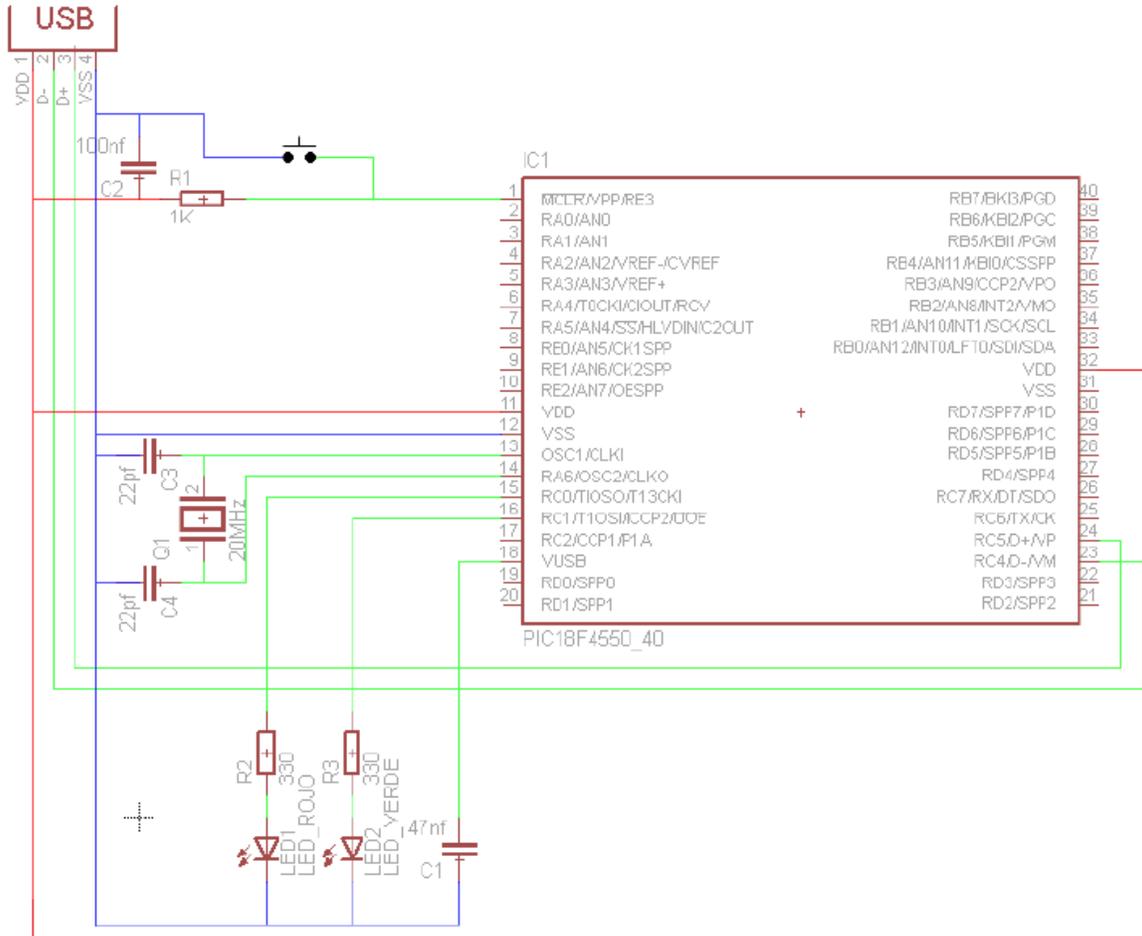


Figura 17. Conexión de microcontrolador.

## 5.2 Diseño eléctrico

El motor seleccionado con anterioridad tenía las características necesarias para el sistema, sin embargo, al intentar conseguirlo en diferentes lugares se encontró con que está agotado y el costo por pedirlo exteriormente (por internet a otro país) se elevaba mucho. Es por eso que se buscó otra opción similar que cumpliera con los requerimientos exigidos; se llegó a un motor de corriente directa que cumplía con las especificaciones y se ajustaba al modelo.

La selección fue un motor MY1016 de “Unite Motor” con características enumeradas en la Tabla 8. (Unite Motor, 2013)

*Tabla 8. Especificaciones del motor.*

<b>Modelo</b>	<b>MY1016</b>	
<b>Potencia de Salida</b>	350 Watts	350 Watts
<b>Voltaje de entrada</b>	24V DC	36V DC
<b>Velocidad media</b>	3000 rpm	3200 rpm
<b>Velocidad sin carga</b>	3850 rpm	3850 rpm
<b>Corriente máxima</b>	≤18.70 A	≤12.50 A
<b>Corriente sin carga</b>	≤2.20 A	≤2.0 A
<b>Par</b>	1.11 N.m	1.11 N.m

Como se puede ver en la tabla, las características del motor superan las necesarias, además de que el voltaje que se utilizará es de 24 Volts; por lo que es una buena opción y se integra al modelo adecuadamente.

### **5.3 Diseño mecánico**

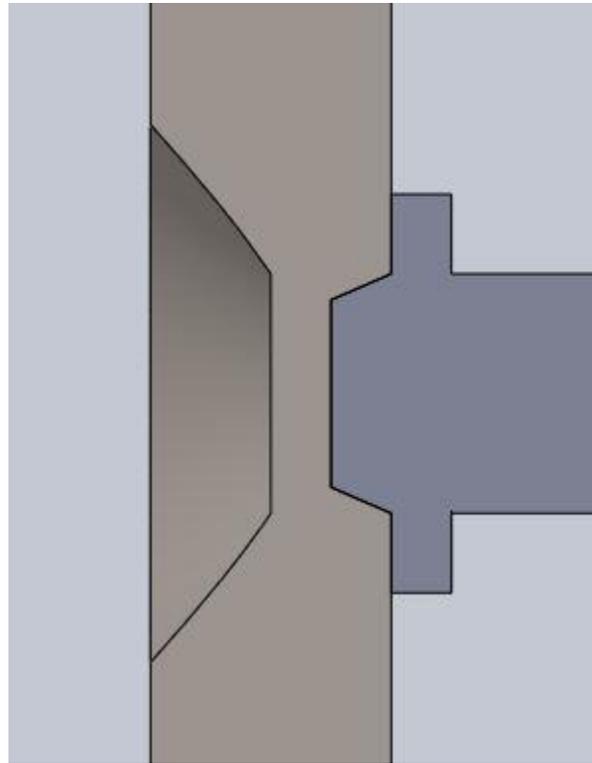
Hablando del dispositivo de sujeción, se había decidido utilizar un perro de arrastre con una configuración circular que sostuviera la pieza con un prisionero y que se ajustara a un tamaño predeterminado, teniendo que fabricar varios de estos dependiendo las probetas que se quisieran maquinar. Esto, sin embargo, resulta poco práctico y deriva más trabajo de fabricación, por lo que se cambió por un perro de arrastre rectangular en dos piezas y con dos tornillos que se aprietan para presionar la probeta entre las caras de contacto, así, éste podrá adaptarse a cualquier diámetro y sirve con el mismo principio y da las mismas ventajas que se han planteado ya.

En cuanto al contrapunto, se decidió utilizar un eje con un ángulo al final de 30°, el cuál irá sujeto por un par de rodamientos que le darán un movimiento adecuado y un centrado perfecto con la pieza que alineará, está sostenido por una pieza que se ajustará con un tornillo

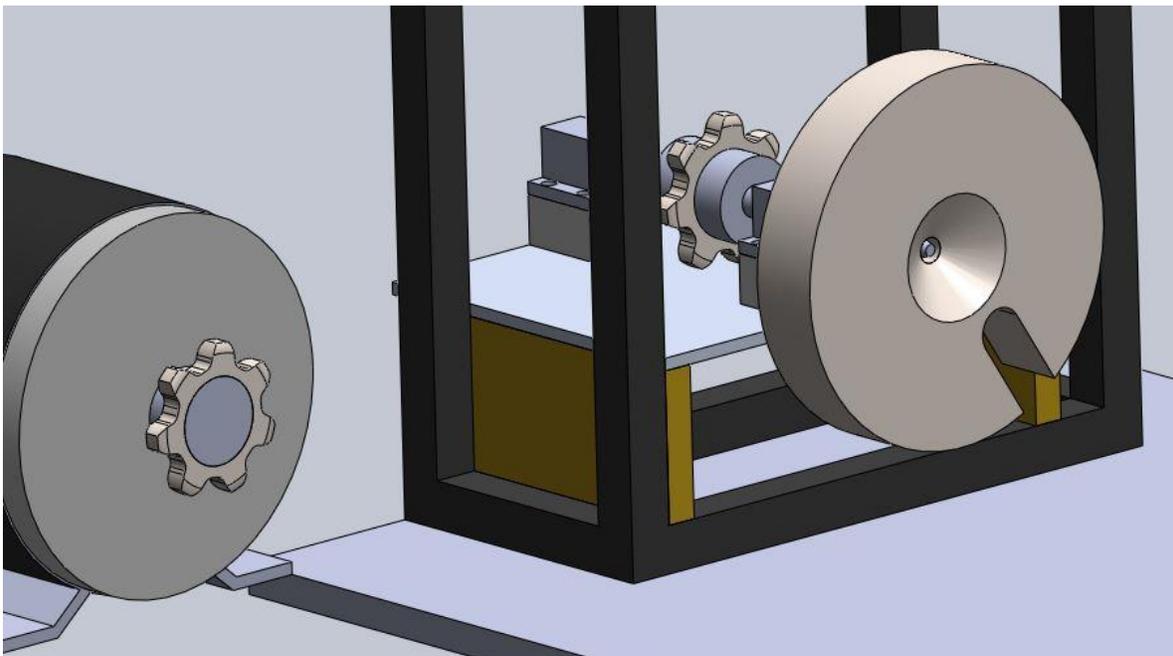
a una placa. Las ventajas que supone fueron facilidad de construcción, de utilización y ahorro en los materiales, además de ser completamente útil, ya que no necesita tener las características de un torno convencional dadas las restricciones del sistema que son maquinar probetas.

La transmisión de movimiento rotacional se había contemplado hacerla de forma directa, uniendo el motor y el plato giratorio sin ningún elemento de por medio. No obstante, se observó que esta medida es muy arriesgada debido a que no se podría ofrecer un centrado perfecto y muy probablemente se producirían problemas por esta razón.

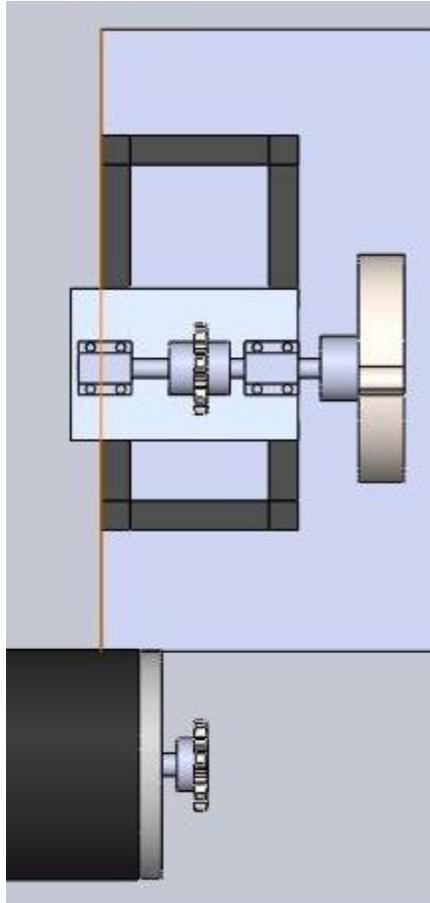
Por eso se decidió crear un sistema de transmisión entre el motor y el plato giratorio como se describe más adelante. El motor se acopla a una catarina, la cual transmite el movimiento por medio de una cadena a otra catarina, la cual va enclavada en un eje que está alineado por un par de chumaceras, y éste a su vez fijado al plato giratorio por medio de un cono morse y tornillos, con lo cual se aseguraría un centrado perfecto y una sujeción de los elementos adecuada. Los acoplamientos entre elementos se realiza por medio de coples con tornillos o prisioneros, según fuera requerido el caso. Las figuras siguientes muestran los dibujos hechos de este sistema.



*Figura 18. Cono morse de plato giratorio y eje.*



*Figura 19. Vista del sistema de transmisión.*



*Figura 20. Vista superior del sistema de transmisión.*

# Capítulo 6. Construcción e implementación

Durante este capítulo se explicará cómo se construyó el prototipo y la implementación que se hizo, para que cumpliera con los objetivos propuestos. Esto se hará por etapas, comenzando por la parte mecánica, después la electrónica y finalmente la programación que le fue realizada.

## 6.1 Construcción mecánica

Para construir el sistema, se tomó primero la estructura general, que sostendrá al portaherramientas y le dará movilidad en dos ejes, además de soportar al contrapunto y al plato giratorio en general. Se construyó a partir del perfil de metal seleccionado, se le fueron agregadas varias placas metálicas con rodamientos y barrenos para que sostuvieran los ejes y tornillos de potencia para darle movilidad a otras piezas. La mayor parte del material fue donado por parte del CIITEC (Centro de Innovación e Investigación Tecnológica) del Instituto Politécnico Nacional.

La base está hecha a partir de una placa grande de aluminio, uniéndola con una pequeña para soportar el motor, dado que la primera no tenía el espacio suficiente para hacerlo. A ella se atornilló toda la estructura y el motor con diferentes tornillos dependiendo su función; fueron añadidos en la placa con barrenos pasados o con cuerda y si quedaban por debajo de la placa se les hizo una caja, con el objeto de que no levantaran la placa del suelo y evitar vibraciones. Después fue pintada y grabada con un logo de la unidad, como se muestra en la Figura 21.



*Figura 21. Placa base de estructura.*

Los coples de los ejes y el motor fueron hechos con acero reutilizado, el cual se obtuvo en una sola pieza y cortó en varias partes para que sirviera al propósito. Después se careó, se redujo su diámetro, se le hicieron barrenos para el eje o para sujeción y se aseguró que todo estuviera centrado; se utilizó para el objetivo un torneado por medio de rimas, las cuales iban desbastando los centros a muy pequeñas distancias y dejaban el material lo más parejo y exacto posible, esto último es muy importante ya que garantizó la precisión de la transmisión del movimiento. Para el motor se hizo uno que entra a presión, de esta forma se ajustó a la pieza de la flecha y se centró por medio de una prensa que lo fue ajustando de manera correcta (Figura 22). Por otro lado, el cople del eje de transmisión fue hecho del mismo diámetro pero con un barreno donde va un tornillo prisionero, el cual sostiene a éste con el eje; de esta forma se transmite el movimiento de forma correcta y se mantiene la precisión de movimiento. Las catarinas fueron medidas de igual manera a presión en ambos coples, siendo el ajuste óptimo y sin error en la colinealidad con el otro.



*Figura 22. Cople del motor con catarina.*

El eje de transmisión de movimiento fue maquinado de un extremo para que tenga un cono de  $15^\circ$  de inclinación, tuvo que ser esmerilado en algunas áreas debido a que presentaba un templado muy fuerte y no era posible hacer nada en él mientras lo presentara (dureza 50 HRC). Se hicieron unas ranuras igualmente con el esmeril donde tienen que entrar los tornillos prisioneros para ofrecer estabilidad y un área de presión, además de ser cortado para tener la longitud necesaria (Figura 23).

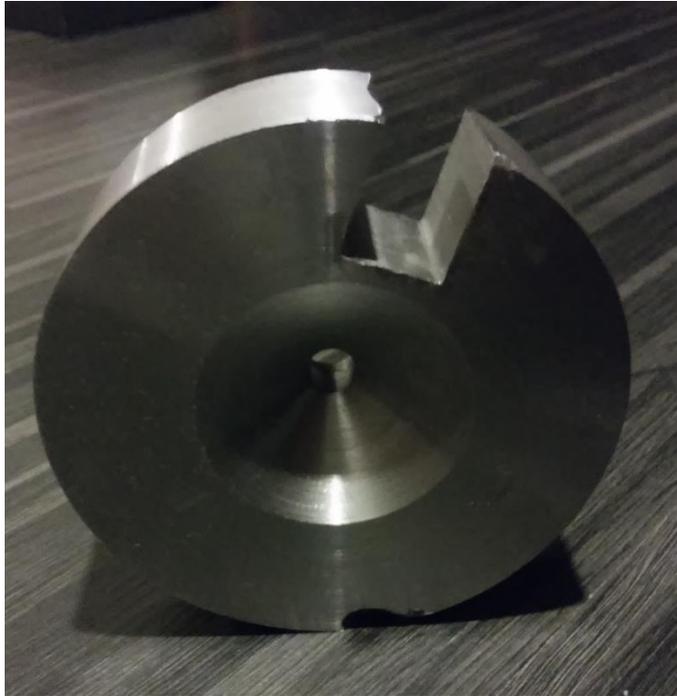


*Figura 23. Eje de transmisión.*

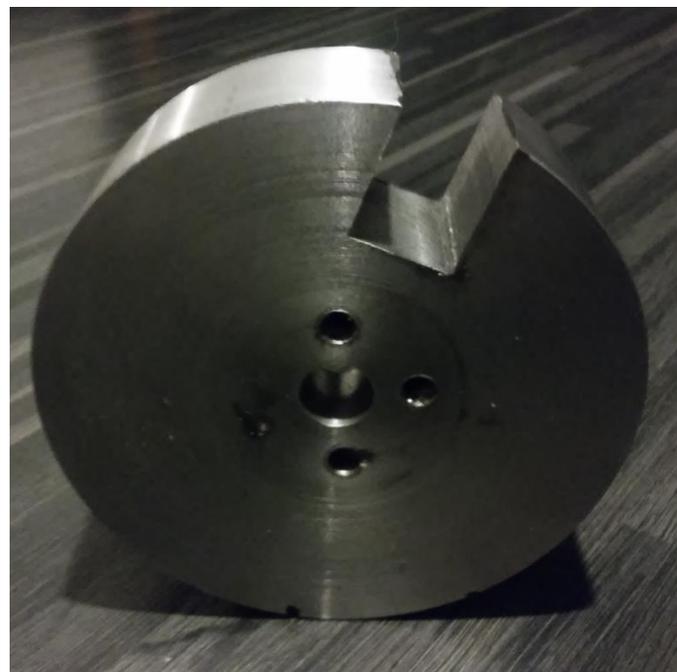
El eje de transmisión se sostiene por dos rodamientos que lo alinean y le dan soporte, y él a su vez sostiene el plato giratorio. El anterior fue maquinado de un pedazo de acero de desecho, quitándole los restos de soldadura y material endurecido que presentaba primero con un esmeril, para dejarlo plano y despejar las caras de áreas más duras por efecto de soldadura. Primero se carearon de ambos lados y se hizo circular por medio del torno, disponiendo la pieza entre el chuck y el contrapunto, maquinando su contorno; después se corrigieron sus desniveles y se dejó completamente circular, para comenzar a hacer los conos de ambos lados. Estos fueron de  $15^\circ$  en un extremo para encajar con el cono del eje y de  $53^\circ$  del otro para tener un inicio mayor de 50 mm y final de 10 mm, lo cual se obtiene de acuerdo a las especificaciones requeridas. Después de darle un terminado adecuado para sostener las probetas y centrarse automáticamente, se procedió a barrenarlo para que encajase con el cople que lo aseguraría al eje de transmisión, siendo éstos con cuerda en el plato y pasados en el otro. Finalmente se le hizo la ranura que sostendrá al perro de arrastre por medio de un cortador y fresadora, siendo éste de  $\frac{3}{4}$  de pulgada para darle un buen ajuste. El material de entrada se muestra en la Figura 24 y la pieza obtenida se pueden observar en la Figura 25 vista frontal y en la Figura 26 vista posterior.



*Figura 24. Acero para plato giratorio.*



*Figura 25. Vista frontal del plato giratorio.*



*Figura 26. Vista posterior del plato giratorio.*

El perro de arrastre fue manufacturado a partir de una barra de acero, fue cortada en dos partes y rectificadas después en todas sus caras. En ambas se hicieron barrenos pasados colineales para los dos tornillos que darán ajuste a la pieza, mientras que en uno se soldó un pedazo de medidas iguales pero longitud menor para entrar en la ranura del plato giratorio. Las dos piezas resultantes fueron unidas por dos tornillos largos y apretados con dos tuercas que darán la distancia requerida y sostendrán a la pieza fuertemente como se ilustra en la Figura 27.



*Figura 27. Perro de arrastre.*

El contrapunto fue hecho a partir de un eje de acero inoxidable templado, el cual fue esmerilado en un extremo y se hizo cónico a  $30^\circ$  en una afiladora (Figura 28). Después se le pusieron unos rodamientos que le dan soporte y finalmente se atornillaron en una placa y se le puso una pieza rectangular que le dará la distancia a la pieza correcta y se ajustará por medio de un tornillo y tuerca a la misma placa; además se agregó un aditamento opcional que sirve para soportar el contrapunto cuando maquina piezas muy cortas y la pieza mencionada anteriormente no puede hacerlo. El aditamento fue hecho de aluminio y es

colocado entre la pieza y el contrapunto, como se observa en la Figura 29, pero no se utiliza siempre.

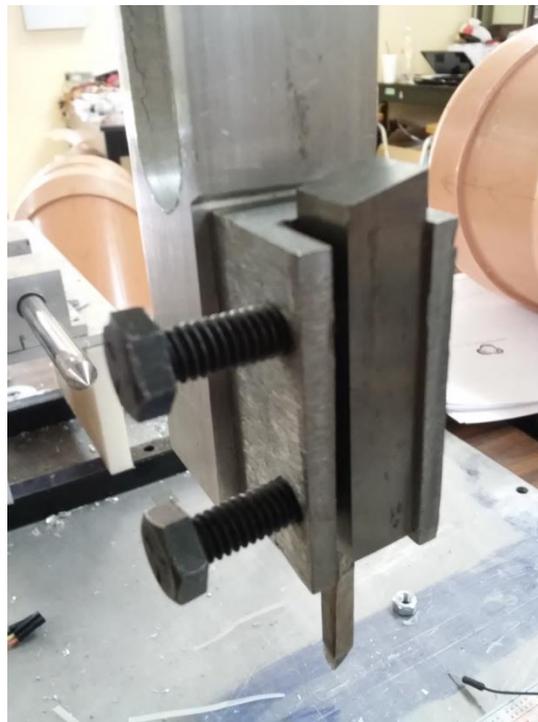


*Figura 28. Contrapunto y rodamiento.*



*Figura 29. Eje de contrapunto.*

El portaherramientas fue construido a partir de un bloque de acero, primero fue rectificado en todas las caras por medio de una fresadora y posteriormente se le realizó la ranura que sostendrá al buril. Finalmente se le hicieron los barrenos donde entran los tornillos que ajustan a la herramienta y los otros pasados que sirven para sostenerlo a la barra de la estructura; estos tuvieron que tener una caja para que no obstruyeran el espacio del buril y los tornillos se apretaron con una tuerca en lugar de cuerda, dado que así ofrecerían un mejor soporte y estabilidad, tal como se ve en la Figura 30.



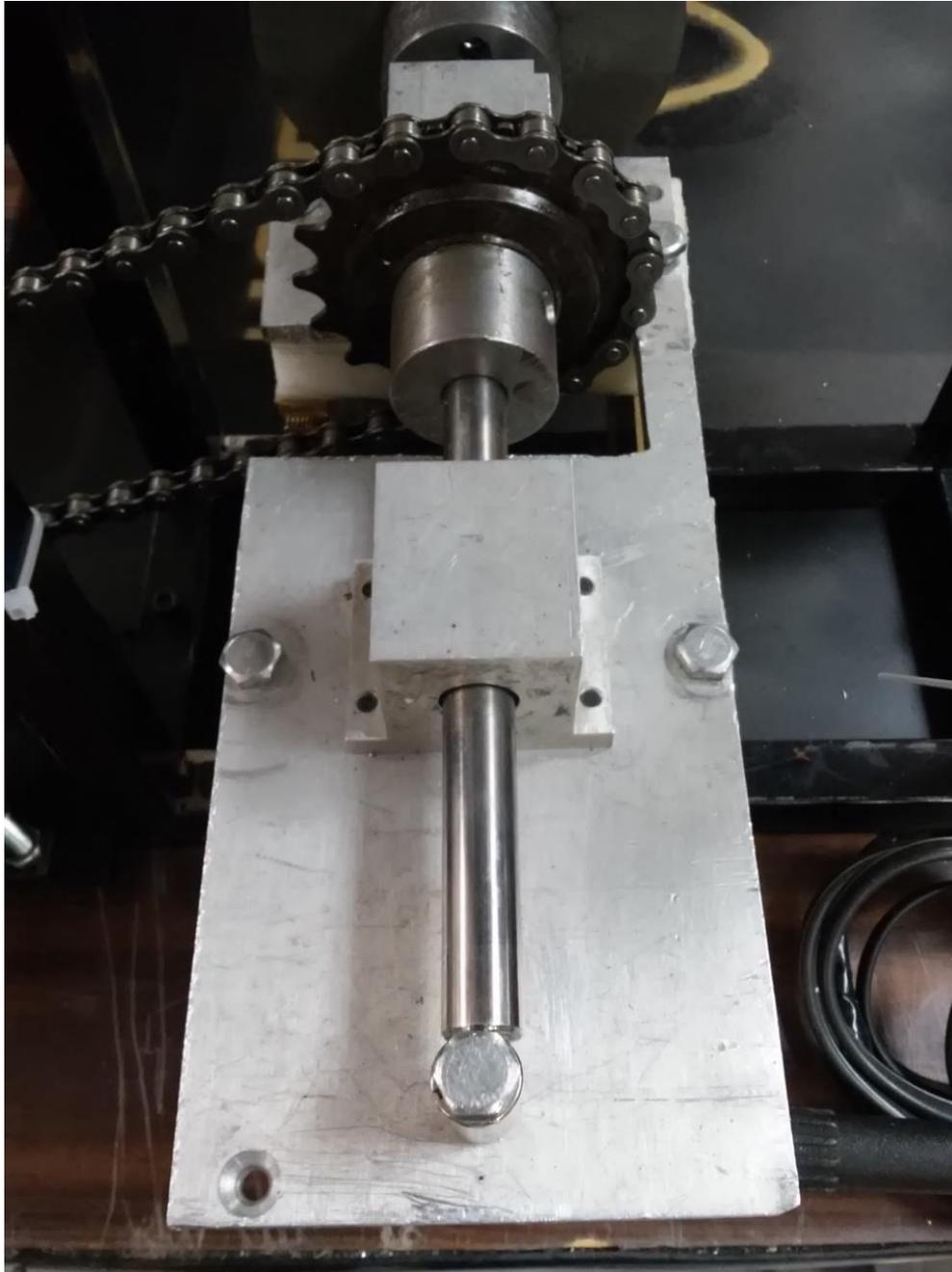
*Figura 30. Portaherramientas.*

Para darle mayor estabilidad al plato giratorio se puso un tope que guía al eje para que no se vaya hacia atrás mientras está trabajando y una cadena lo hace no irse hacia enfrente. La cadena está colocada en la catarina puesta a presión en el cople del eje; este eje está posicionado en dos rodamientos que lo hacen girar suavemente y estos a su vez en una placa de aluminio sostenida en dos placas que le dan el altitud necesaria para estar centrado con el contrapunto y que el plato giratorio no choque contra la base. En la Figura 32 se observa el

tope atornillado a la placa, mientras que en la Figura 31 se ve el eje en general conectado al motor funcionando (en la foto no se muestra el tope).



*Figura 31. Eje con componentes unidos a motor.*



*Figura 32. Eje de plato giratorio con todos los componentes integrados.*

El sistema mecánico de sujeción, maquinado e impulso de probetas se puede observar sin finalizar en la Figura 33 y parcialmente con cilindro de aluminio en la Figura 34.



*Figura 33. Sistema mecánico.*



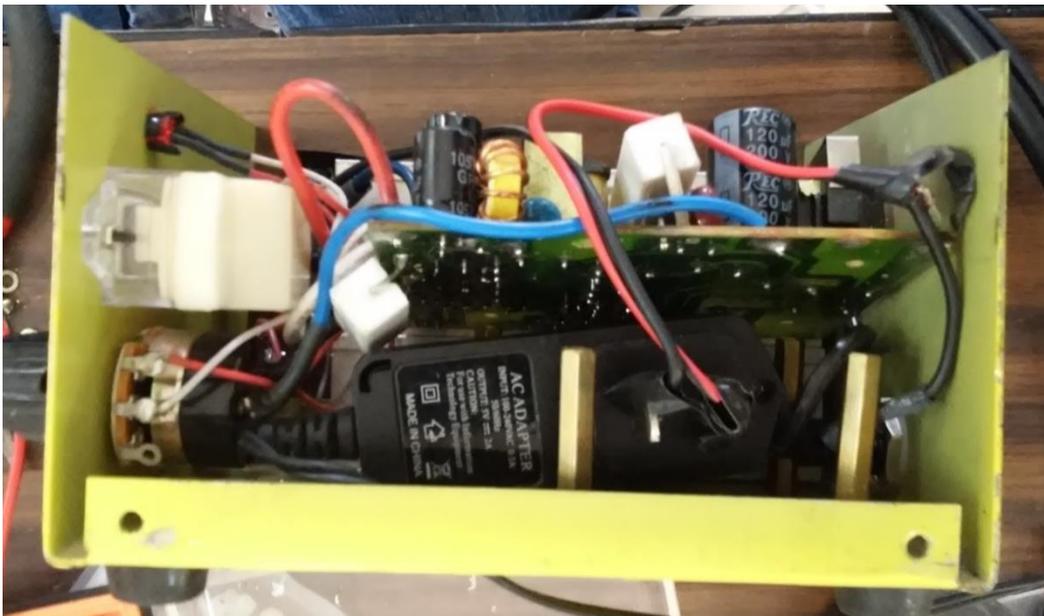
*Figura 34. Sistema mecánico con probeta.*

Sin embargo, al final se determinó reducir el altura de la estructura para reducir vibraciones y dar mejor terminado a las piezas, por lo que se cortaron los perfiles de acero 15 cm. Primero se desmontaron todos los componentes y se hizo un patrón con un pedazo de metal, el cual fue utilizado como ayuda para cortar cada una de las patas de la estructura, para que quedaran a la misma altura. Después de cortar, se limaron todas las partes para que quedaran lisas y a la misma altura, para lo cual nos ayudamos con el patrón que ya habíamos utilizado; se quitaron los pedazos sobrantes del otro lado para dejar la base libre para soldar la estructura de nuevo.

Se montó la estructura sobre la base y con ayuda de un nivel se aseguró estuviera recta; a continuación se procedió a soldar puntos en cada una de las patas, cerciorándose siempre que no se perdiera rectitud auxiliándonos de escuadras. Finalmente se le pusieron cordones de soldadura en todas las uniones y se procedió a volver a montar todos los componentes y fijarlos a la nueva estructura más corta.

## 6.2 Construcción eléctrica y electrónica

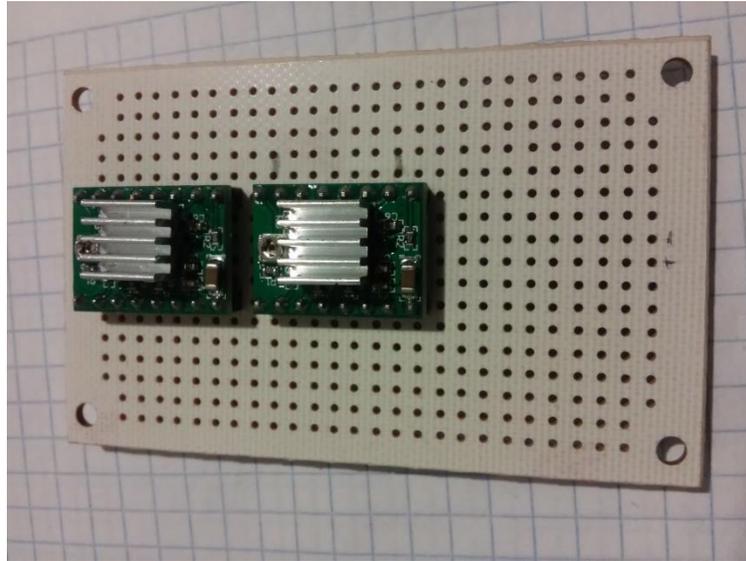
El alimentación de todos los componentes tanto electrónicos como de potencia fue proporcionada de tres fuentes, una de 5 V con 2 A, otra de 12 V a 2 A y la última de 19 V a 3 A, todas de corriente directa. Éstas fueron construidas o conseguidas de distintos lugares, pero se unieron en una sola para mayor comodidad y para que se controlarán y energizarán en un solo lugar y con un comando único, el cual también ayudaría a instalar un botón de paro general, que detendrá cualquier sistema al momento de accionarlo, independientemente de los demás paros locales que se tienen en los subsistemas. En la Figura 35 se muestra la fuente general por dentro.



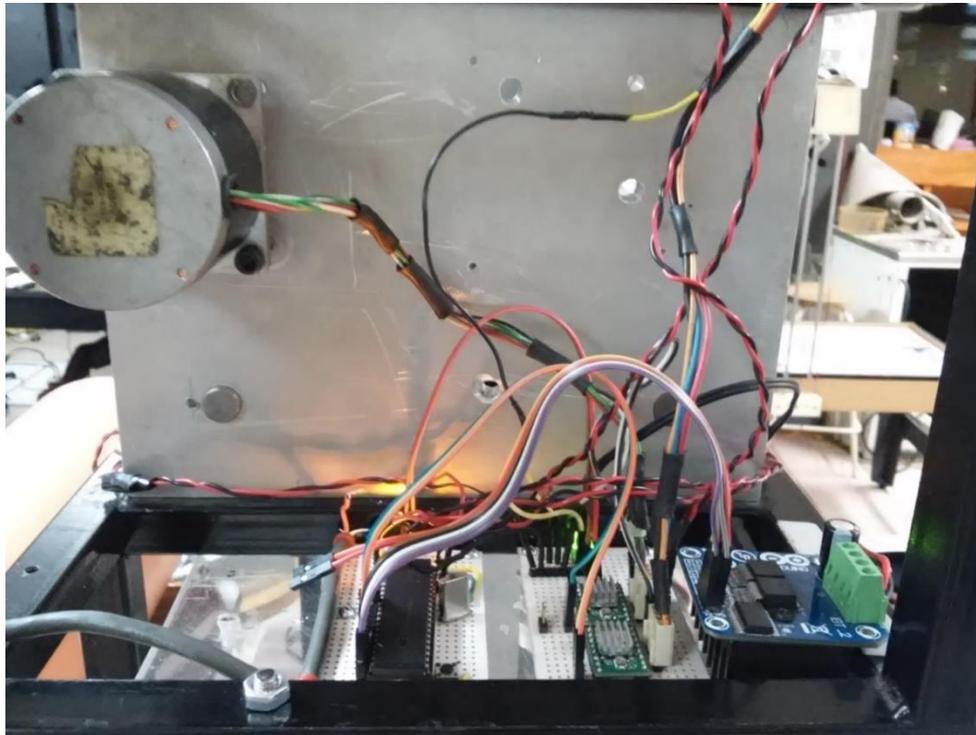
*Figura 35. Fuente de alimentación general.*

Para la construcción electrónica se ocuparon tablas de baquelita y se soldaron los controladores de los motores a pasos en ellas, Figura 36. Los motores fueron conectados a las placas al igual que la fuente de estos y la fuente de 5 V para los circuitos. El microcontrolador fue conectado como se mostró en la Figura 17 y a éste se le insertaron las señales provenientes de la computadora por medio de un cable USB. Estos circuitos están en el lateral de la estructura como se muestra en la Figura 37, montados cerca de los motores a

controlar por conveniencia en conexiones, dado que así la distancia no supondrá problema y no se generará mucho ruido.



*Figura 36. Controladores de motores a pasos.*



*Figura 37. Circuitos en estructura.*

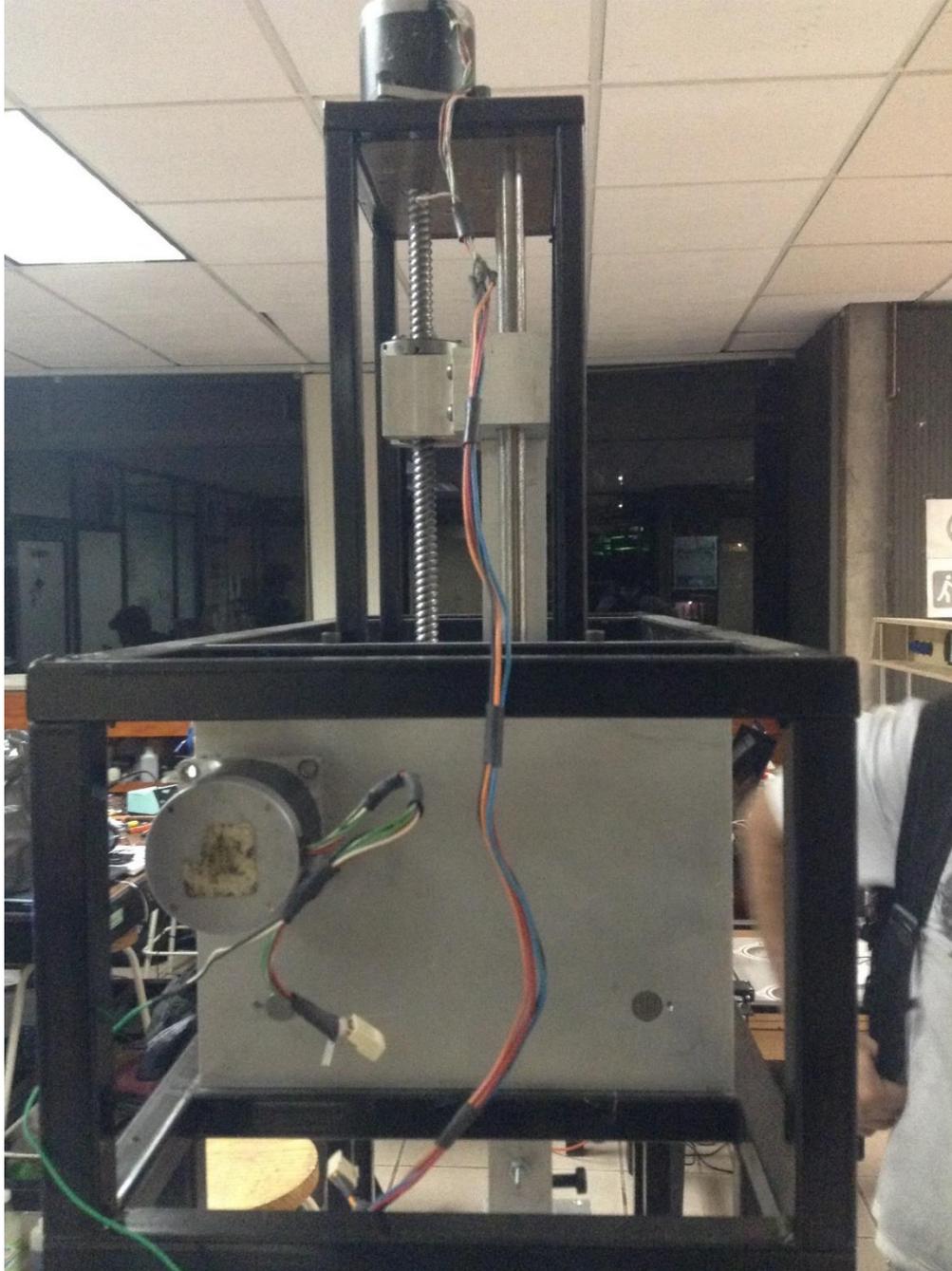
El motor de corriente directa que dará movimiento al eje de transmisión fue posicionado a un lado de la estructura, fuera de ella, dado que se necesita cierta distancia entre catarinas para que giren por medio de la cadena, Figura 38. Éste es controlado por un *driver* que fue posicionado cerca del motor y conectado al microcontrolador para recibir el PWM que modularía la velocidad y a dos fuentes, una que alimenta el circuito como tal y otra al motor.



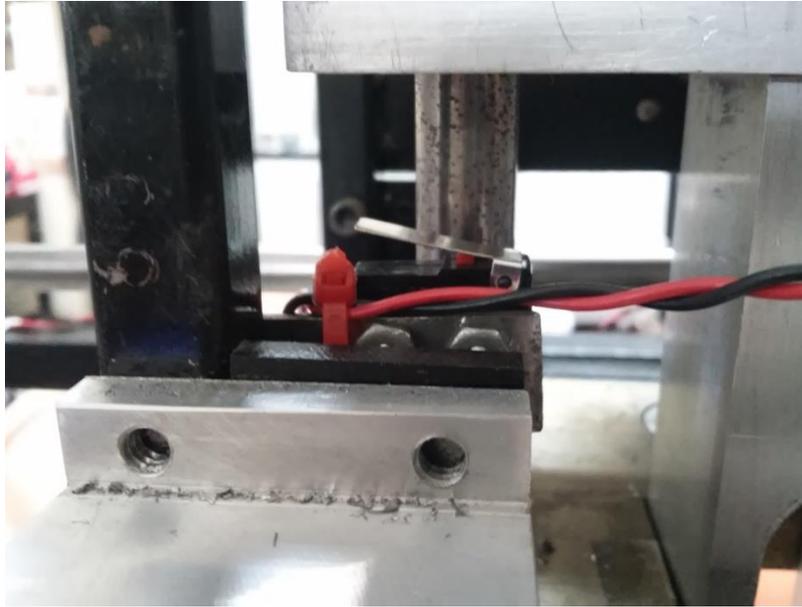
*Figura 38. Motor de corriente directa en estructura.*

Los motores a pasos fueron atornillados a la estructura y acoplados a los tornillos de potencia que mueven los ejes de la barra que sostiene al portaherramientas, como se observa en la Figura 39. En tanto que al final de carrera de cada eje del portaherramientas, cuando la herramienta pudiera tocar el plato giratorio, llegara muy abajo o muy arriba o terminara su recorrido en los tornillos de bolas recirculantes, se colocó un sensor de fin de carrera que se

conectó al microcontrolador con el fin de conocer el cero máquina y dar un paro local en caso de llegar a una condición de extremidad no contemplada; estos sensores se colocaron como se muestra en la Figura 40.



*Figura 39. Motores a pasos en la estructura.*



*Figura 40. Sensor de fin de carrera.*

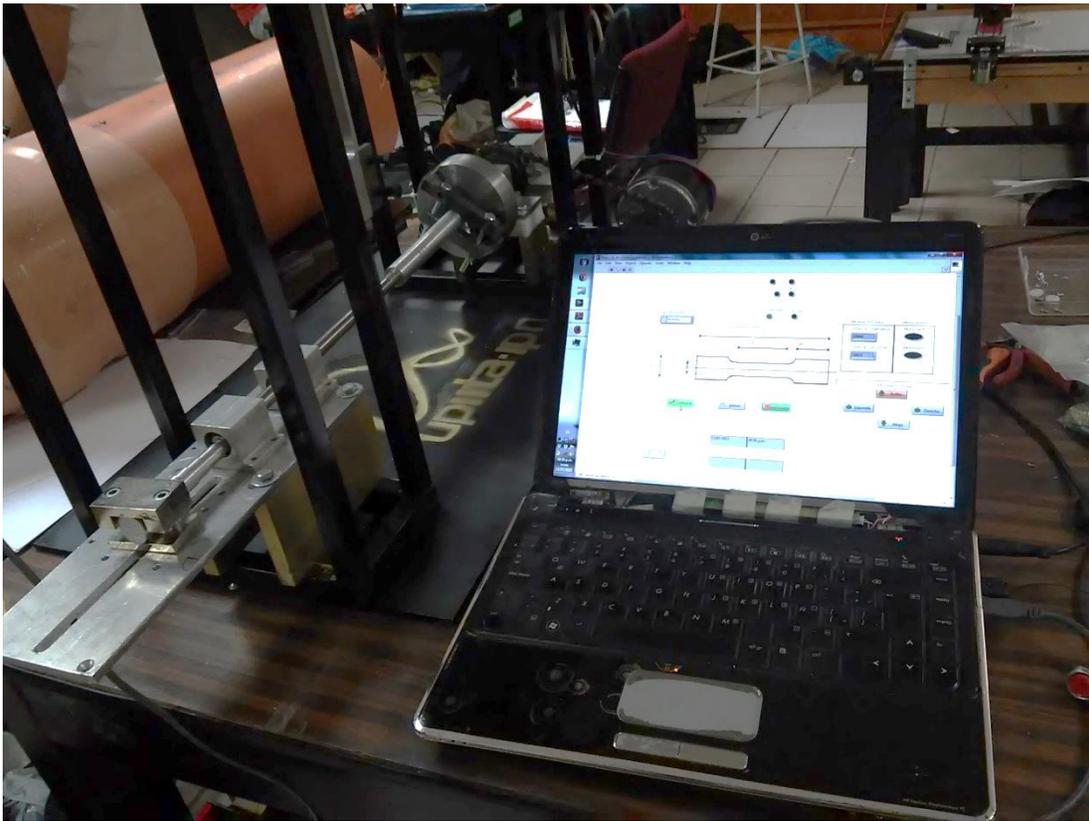
## **6.3 Programación**

La programación de los movimientos de los motores, su dirección, la velocidad, paros y otras señales se realizaron en una computadora a partir de LabView, que envía señales al microcontrolador y él a su vez transmite las señales a todos los dispositivos de control. En el programa se hicieron diagramas a bloques que reciben y envían información a partir de una interfaz USB y toman decisiones a partir de las instrucciones que se implementaron.

Una parte del programa se centra en el envío y recepción de señales con el microcontrolador, mientras que otra parte se dedica a contar pulsos para enviarlos a los motores a pasos, los cuales significan la distancia que avanzará el portaherramientas, a qué velocidad y en qué dirección. También está la sección que activa el motor de corriente directa y lo controla a partir de una señal de PWM.

La interfaz está hecha de una forma sencilla de comprender, con pocas opciones y la información necesaria, para no confundir al usuario y darle una comprensión del sistema general. Consta de un botón de paro, un menú de probetas a realizar, estado del programa y

el estado de operación. La comunicación es a través de un protocolo USB con la tarjeta de adquisición de datos que se comunica con el programa para dar y recibir la información necesaria; ésta es dada desde la computadora que es conectada y tiene la capacidad de dar las órdenes que se requieran en cualquier momento, mientras recibe los datos necesarios a lo largo de la manufactura. Esto puede ser apreciado en la Figura 41 que muestra a un ordenador conectado al sistema.



*Figura 41. Computadora conectada al sistema.*

## Capítulo 7. Resultados

Al término del diseño y construcción del “Prototipo de Torno CNC para Maquinado de Probetas” se ha concluido que los objetivos propuestos en el protocolo fueron cumplidos satisfactoriamente, dado que se llegó a los resultados esperados y no se presentaron problemas insorteables. Se hizo una etapa de análisis y de comparación entre las diferentes posibilidades que se tenían al construir el prototipo para obtener la solución más adecuada a nuestras posibilidades.

Dado el tiempo y los recursos con los que se disponían se tuvieron que hacer algunas adaptaciones y ciertas restricciones al modelo, sin embargo, esto no afectó la funcionalidad, pero sí limitó su presentación y presentó muchas posibilidades de trabajos a futuro para su mejora y ampliación de alcance.

La estructura diseñada y construida es apta para tornejar probetas de un rango de longitud entre 150 y 300 mm, así como una capacidad de maniobrabilidad amplia, además de tener espacio suficiente para albergar todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos necesarios.

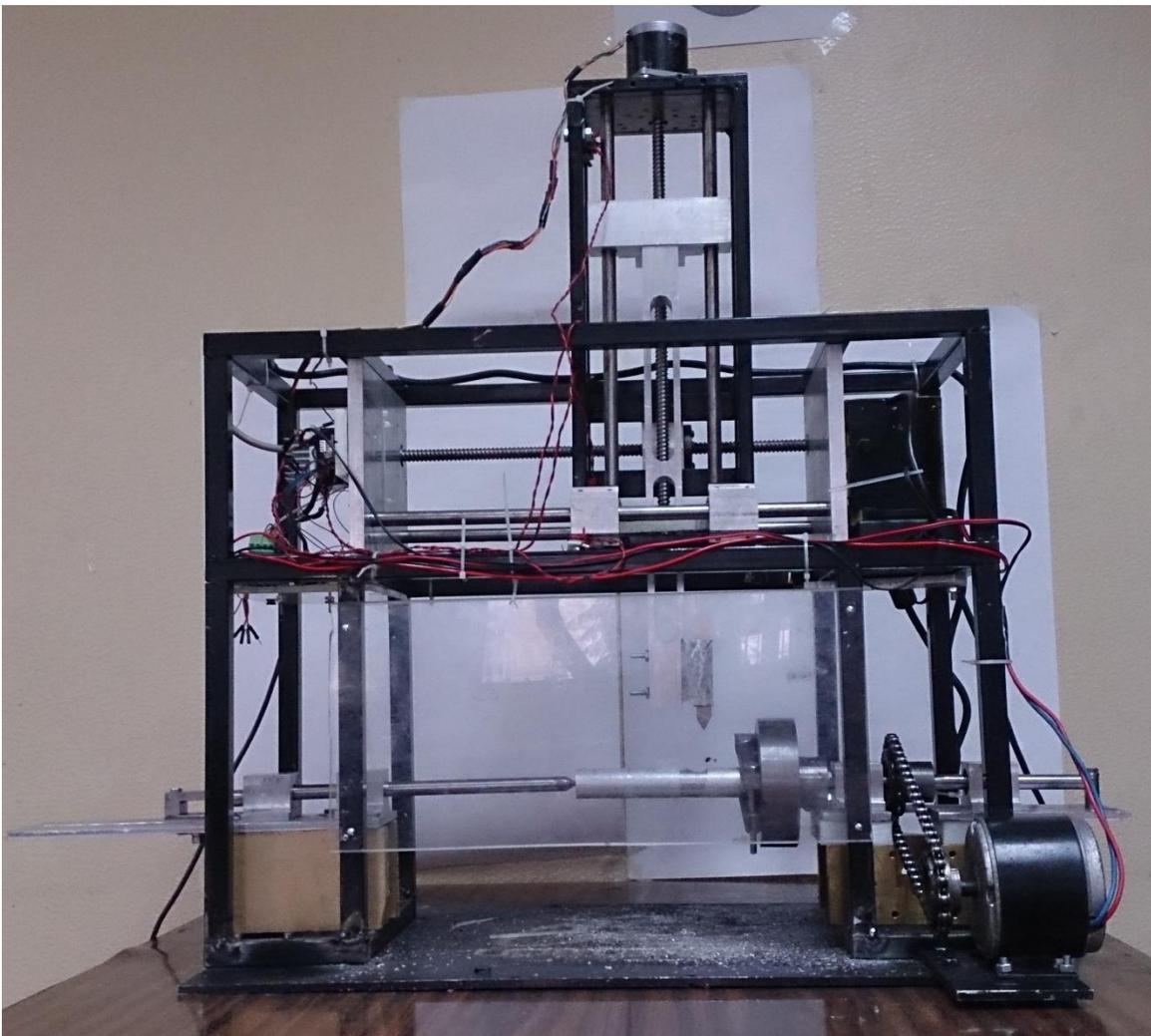
El portaherramientas propuesto y construido puede sujetar buriles de hasta media pulgada y soporta grandes esfuerzos debido a la dureza y tenacidad del acero con que fue hecho; es desmontable y se adapta fácilmente a la estructura de manera sólida.

El sistema de transmisión de movimiento tanto en los ejes del portaherramientas así como los del motor que impulsa la probeta fueron seleccionados e implementados de manera exitosa ya que realizan su trabajo de manera eficiente y no presentan problemas. En el primer caso fueron tornillos de potencia de bolas recirculantes con ejes guía, en el segundo, cadena con catarinas de mismo diámetro.

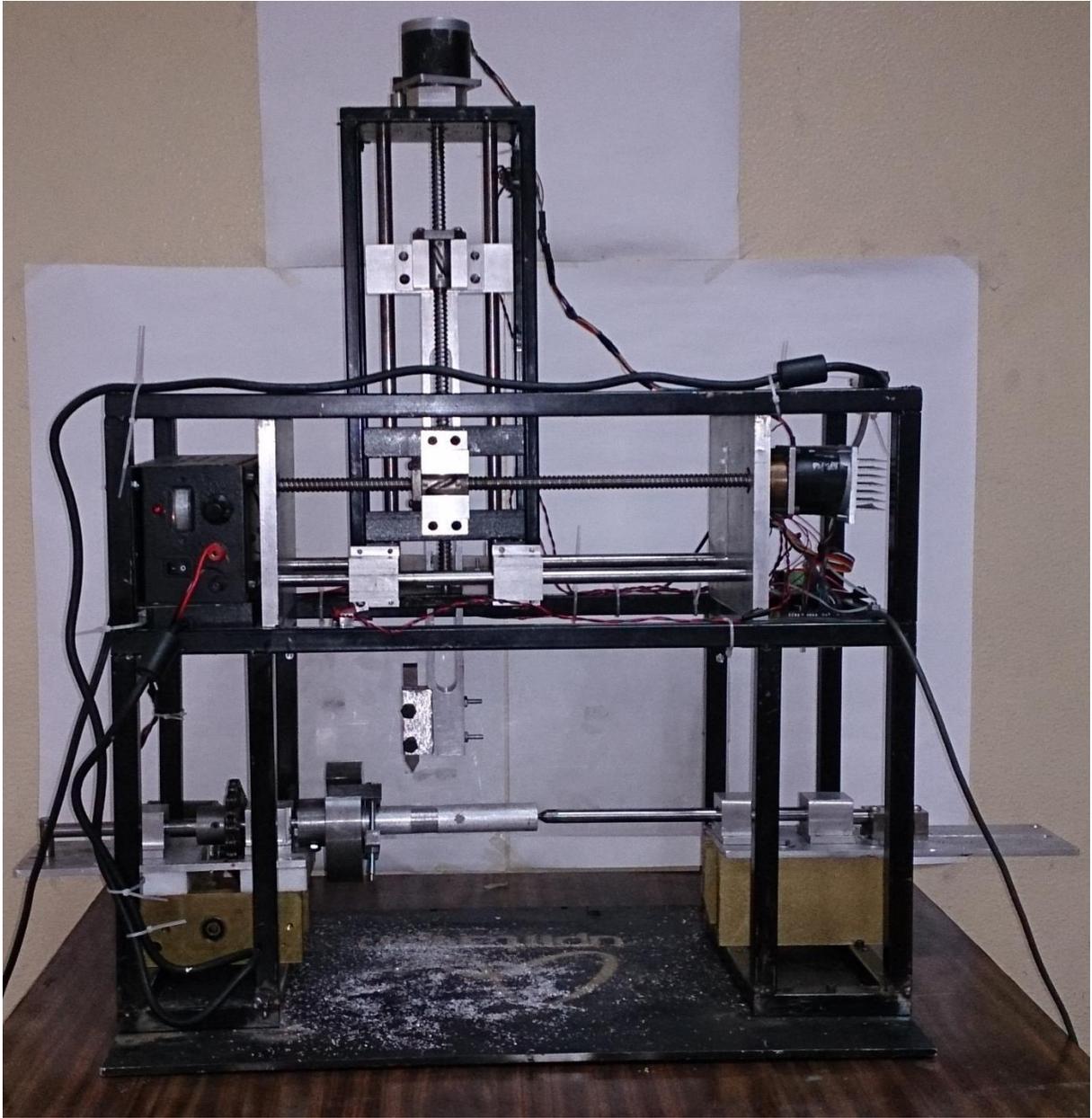
La interfaz gráfica así como todo el control del prototipo fue hecha en LabView por medio de diagramas de bloques que reciben y envían información por medio de una tarjeta de adquisición de datos en un protocolo de comunicación USB, conectando a la computadora con el microcontrolador.

Los dispositivos electrónicos fueron conectados entre sí y a los sistemas eléctricos y mecánicos, teniendo una comunicación adecuada y sin problemas. Estos fueron seleccionados de acuerdo a las necesidades e implementados correctamente.

Todos los subsistemas fueron implementados y probados de manera individual e integral para tener un funcionamiento adecuado; ya integrados todos al sistema se hicieron los procedimientos de validación correspondientes para demostrar su correcto comportamiento. En la Figura 42 se observa el prototipo construido e integrado, mientras que en la Figura 43 se puede ver cómo funciona con un cilindro de aluminio a maquinar.



*Figura 42. Cilindro de aluminio en prototipo.*



*Figura 43. Prototipo de torno CNC para maquinado de probetas*



# Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro

## 8.1 Conclusiones

Las dificultades presentadas fueron principalmente en la parte mecánica, dado que muchos materiales seleccionados eran extremadamente duros o difíciles de maquinar, por lo que se tuvo que recurrir a maquinas especializadas y a un taller más grande y equipado que el de la escuela. También se tuvieron problemas con el alineación de los ejes y la precisión que se debía obtener en distintas partes, lo cual se sorteó trabajando meticulosamente o dando amplios márgenes de tolerancia. Por otra parte, el conseguir los materiales correctos, recibirlos o comprarlos fue de una dificultad bastante alta, tanto que algunos quedaron pendientes y tuvieron que ser sustituidos por otros para poder terminar el trabajo, por lo que se concluye que el adquisición es una parte muy importante en un proyecto y que sin suficiente tiempo de antelación es imposible que ésta concluya bien.

Durante el curso de Trabajo Terminal II, así como de Trabajo Terminal I, se pusieron a prueba todos los conocimientos adquiridos durante la carrera y se practicaron las técnicas aprendidas, lo cual ayudó mucho a la realización del proyecto, que sin embargo, no fue suficiente, ya que se necesitó recurrir a investigación previa y a consultas con expertos en la materia para poder concluirlo.

Al finalizar el prototipo se encontró que el maquinado de probetas resulto, de hecho, más sencillo con este sistema que con un torno convencional, dado que la facilidad de uso es muy grande y la capacidad es adecuada; además de presentar bajos requerimientos en espacio y energía, lo cual lo hace ideal para utilizarse en un laboratorio sin presentar grandes perturbaciones en el área.

La aportación al Instituto Politécnico Nacional es el inicio de una propuesta de solución a problemas derivados de la investigación, atacando algo en particular y normalmente no observado; lo cual sienta las bases para el mejoramiento de la propuesta, así como una introducción para trabajos de un tipo similar pero con mayor alcance, sean materiales cerámicos los que se puedan trabajar, siendo probetas más grandes las que se propongan.

Finalmente, se concluye que los objetivos, tanto generales como particulares, fueron cumplidos y el producto final, un prototipo de torno CNC para maquinado de probetas, cumple con su trabajo y aporta un resultado visible y útil para la investigación.

## **8.2 Trabajo a futuro**

Las principales mejoras que se le pueden hacer a nuestro prototipo realizado son el cambio de materiales a unos de mejor calidad, dado que los utilizados fueron tomados de reúso y maquinados para su adaptación al sistema. Se cree que con materia prima nueva y fabricada específicamente para este uso, el sistema final tendría un ajuste óptimo y su precisión sería mucho mejor.

Por otra parte, se considera que teniendo un motor con mayor potencia se podrían maquinar otro tipo de probetas, además de mejorar su calidad. Igualmente si se integran motores de mayor potencia en el portaherramientas, de manera que pueda desbastar más materiales superando las fuerzas de corte de estos.

Se ha pensado en implementar sistemas de seguridad como guardas y paredes que eviten el contacto entre el usuario y la máquina, además de poner una puerta que tenga un sensor de apertura para evitar que el torno funcione mientras esté abierta.

Finalmente se ha pensado en incluir normas y especificaciones internacionales utilizadas en la industria para el diseño del torno, de tal forma que se convierta en un sistema que cumpla con los requerimientos completos de calidad que debe tener para ser una parte efectiva en un laboratorio de investigación, teniendo una producción de calidad confiable; alcanzando la posibilidad de comercializarlo como herramienta de trabajo en el campo de estudio de los materiales.

# Glosario

**Algoritmo:** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

**Característico:** Perteneciente o relativo al carácter. Dicho de una cualidad: Que da carácter o sirve para distinguir a alguien o algo de sus semejantes.

**Catarina:** Es una rueda dentada para transmisión de potencia por cadena, también conocida por su nombre en inglés como *sprocket*.

**Centrado:** Dicho de un instrumento o de la pieza de una máquina: Cuyo centro se halla en la posición que debe ocupar. Dicho de una cosa: Que está colocada de manera que su centro coincide con el de otra. En un torno consiste en la operación de mover la pieza a maquinar, de tal forma que el eje longitudinal de ésta quede a la misma altura que el eje del transmisor de movimiento rotacional y el contrapunto.

**Chuck:** Palabra anglófona que designa al mandril o prensa de sujeción.

**Compresión:** Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen.

**Cono Morse:** Se le denomina al tipo de acoplamiento cónico entre diferentes piezas circulares, el cual da un centrado de ejes entre ellas muy bueno y proporciona estabilidad y un ajuste alto. El cono Morse está normalizado en conicidad y longitud y se les denomina por números.

**Cople:** Es una parte mecánica vital para un sistema de transmisión de potencia, uniendo dos piezas de manera colineal, transmitiendo potencia mecánica a través del torque a determinada velocidad. La diferencia con otros elementos de transmisión es que los coples transmiten el torque con relación de velocidad 1:1 y en la misma línea de centros.

**Cremallera:** Barra metálica con dientes en uno de sus cantos, para engranar con un piñón y convertir un movimiento circular en rectilíneo o viceversa.

**Especificación:** Acción y efecto de especificar. Fijar o determinar de modo preciso. Que es propio de algo y lo caracteriza y distingue de otras cosas.

**Exactitud:** La capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real.

**Flexión:** Encorvamiento transitorio que experimenta un sólido elástico por la acción de una fuerza que lo deforma.

**Fresa:** Herramienta de movimiento circular continuo, constituida por una serie de buriles o cuchillas convenientemente espaciados entre sí y que trabajan uno después de otro en la máquina de labrar metales o fresarlos.

**Fresado:** Abrir agujeros y, en general, labrar metales por medio de la fresa.

**Hardware:** Conjunto de los componentes que integran la parte material de una computadora, aunque también se utiliza para referirse a los componentes físicos de un sistema.

**Husillo:** Tornillo de hierro o madera que se usa para el movimiento de las prensas y otras máquinas.

**I<sup>2</sup>C:** Es un bus de comunicaciones en serie. La principal característica de I<sup>2</sup>C, es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos y otra para la señal de reloj. También es necesaria una tercera línea, pero esta sólo es la referencia.

**JTAG:** Es una interfaz especial de cuatro o cinco pines agregadas a un chip, diseñada de tal manera que varios chips en una tarjeta puedan tener sus líneas JTAG conectadas entre sí, para que una sonda de testeo JTAG necesite conectarse a un solo puerto JTAG para acceder a todos los chips en un circuito impreso.

**Mandril:** Pieza de madera o metal, de forma cilíndrica, en que se asegura lo que se ha de tornearse. Compuesto por piezas movibles que ajustan a la pieza y además transmite el movimiento.

**Maquinar:** Trabajar una pieza por medio de una máquina.

**Mecatrónico:** Un consenso común es describir a la mecatrónica como una disciplina integradora de las áreas de mecánica, electrónica e informática cuyo objetivo es proporcionar

mejores productos, procesos y sistemas. Es la combinación sinérgica de la ingeniería mecánica de precisión, de la electrónica, del control automático y de los sistemas para el diseño de productos y procesos. Es una disciplina que une la ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, ingeniería de control e ingeniería informática.

**Piñón:** Rueda pequeña y dentada que engrana con otra mayor en una máquina.

**Precisión:** Construido con singular esmero para obtener resultados exactos. La capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones.

**Probeta:** Muestra de cualquier sustancia o material para probar su elasticidad, resistencia, etc. En mecánica y otras disciplinas relacionadas, es una pieza debidamente medida y que cumple con ciertas especificaciones con el fin de ser sometida a ensayos mecánicos.

**Productividad:** Grado de producción por unidad de trabajo. Relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía, etc.

**Requerimiento:** Acción y efecto de requerir. Dicho de lo que se tiene necesidad o de lo que se ha pedido u ordenado.

**Sistema:** Es un conjunto de elementos interrelacionados e interactuantes entre sí.

**Software:** Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

**SPI:** El Bus SPI (*Serial Peripheral Interface*, interfaz serial periférica) es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos que acepten un flujo de bits serie regulado por un reloj (comunicación sincrónica).

**Tensión:** Estado de un cuerpo sometido a la acción de fuerzas opuestas que lo atraen. Fuerza de tracción a la que está sometido un cuerpo.

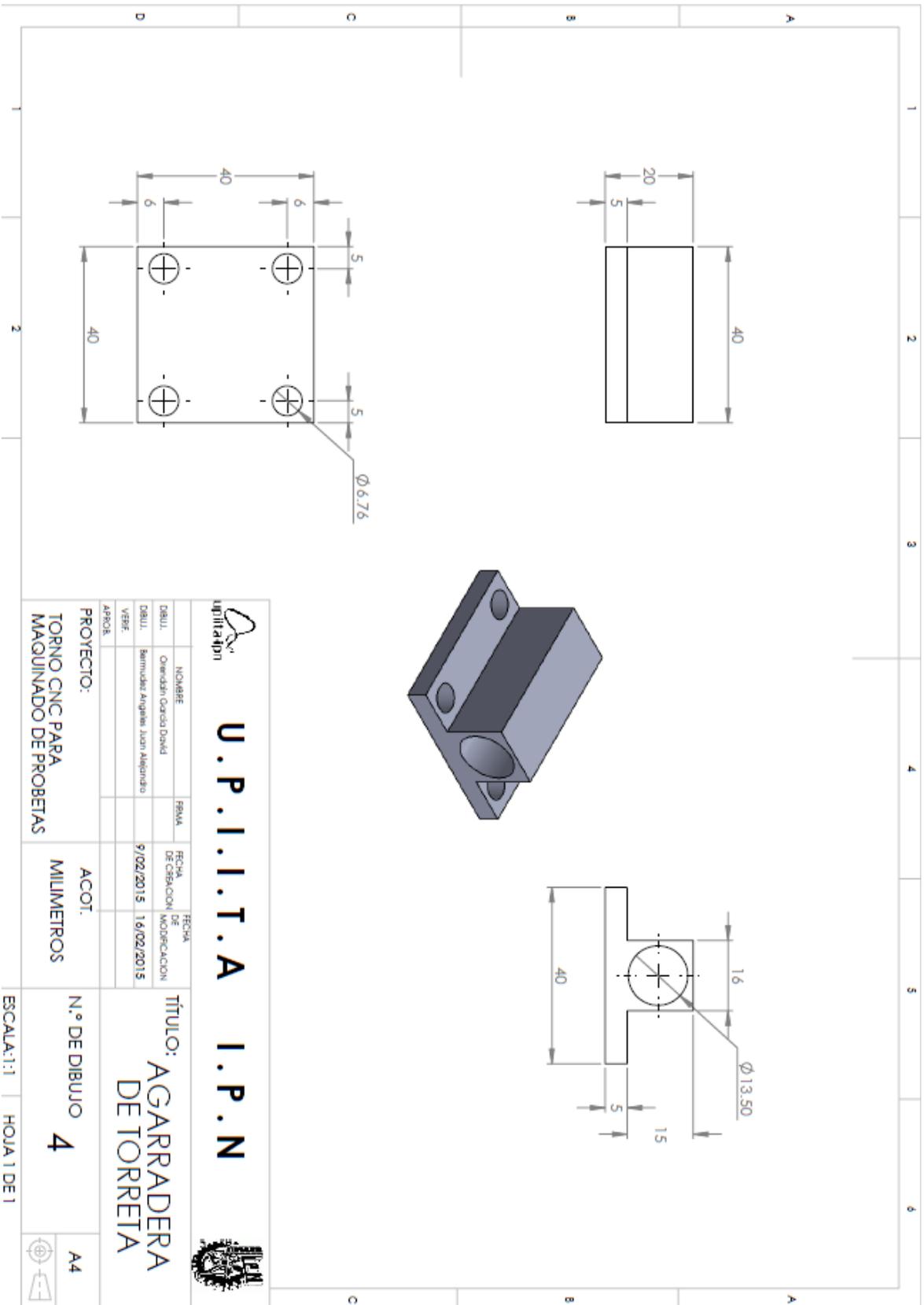
**Torneado:** Acción y efecto de tornear.

**Tornear:** Labrar y pulir un objeto en el torno.

**Torsión:** Acción y efecto de torcer o torcerse algo en forma helicoidal.

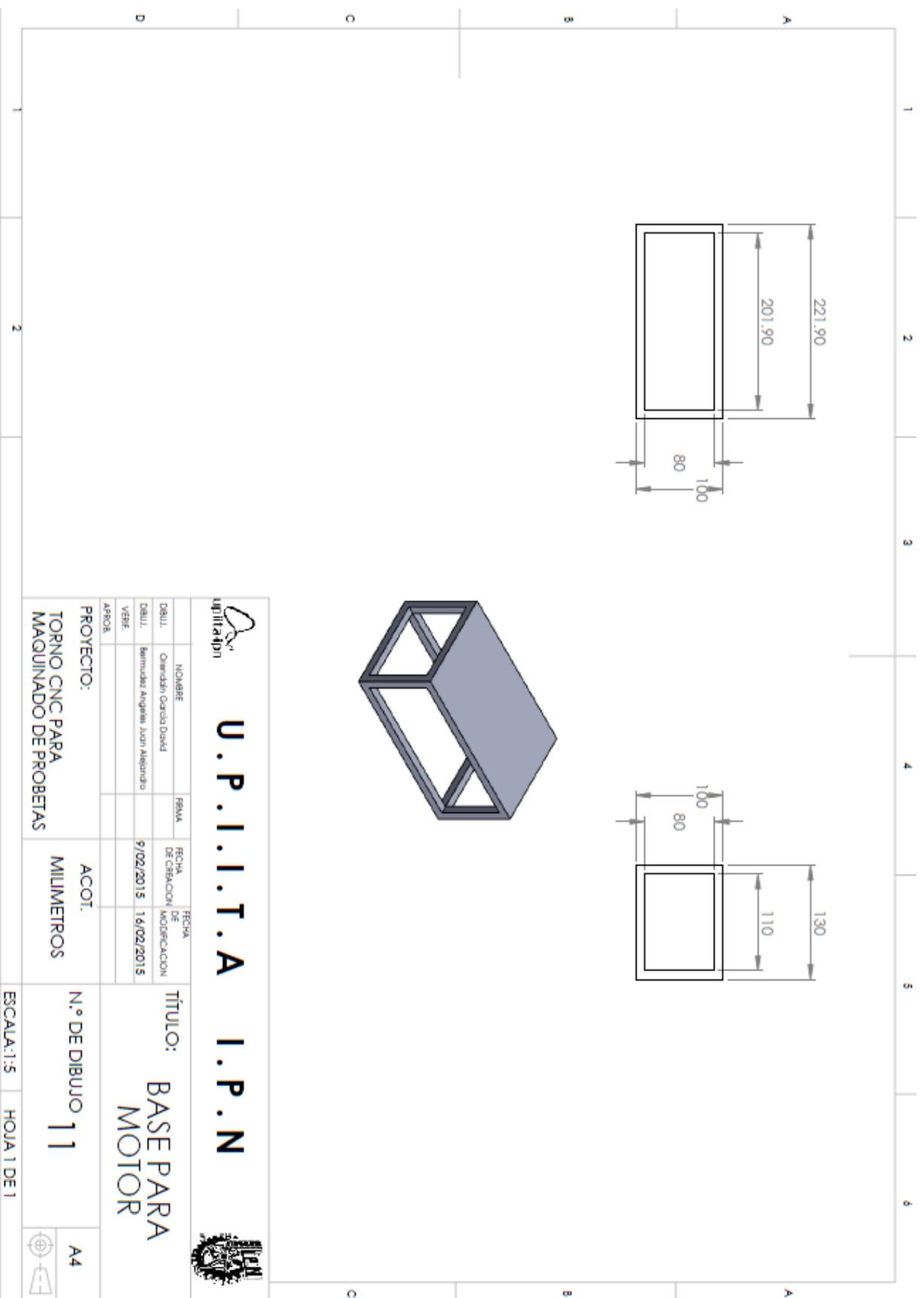
**Torque:** Sistema de dos fuerzas iguales paralelas, de sentidos contrarios y aplicadas en dos puntos distintos, que crean un movimiento de rotación. Magnitud resultante del producto del valor de una fuerza por su distancia a un punto de referencia.

## **Apéndice. Planos y diagramas.**




**U.P.I.I.T.A I.P.N**


NOMBRE	OSWALDO GARCIA DAVILA	FECHA DE OBSERVACION	FECHA DE MODIFICACION	TITULO:	<b>AGARRADERA DE TORRETA</b>
DIBUJ.	Bernabé Ayala Juan Alejandro	9/02/2015	16/02/2015	N.º DE DIBUJO	
VERSE.				<b>4</b>	
APROB.				A4	
PROYECTO:	ACOT. MILIMETROS			ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1
<b>TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS</b>					



**U.P.I.I.T.A I.P.N**



NOMBRE	FECHA	FECHA DE CEBACION	FECHA DE MODIFICACION
OSWALDO GARCIA DAVID		9/02/2015	16/02/2015
DEBIL.	ARMANDO ANGELIS JUAN ALBERTO		
VERB.			
APROB.			

PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS

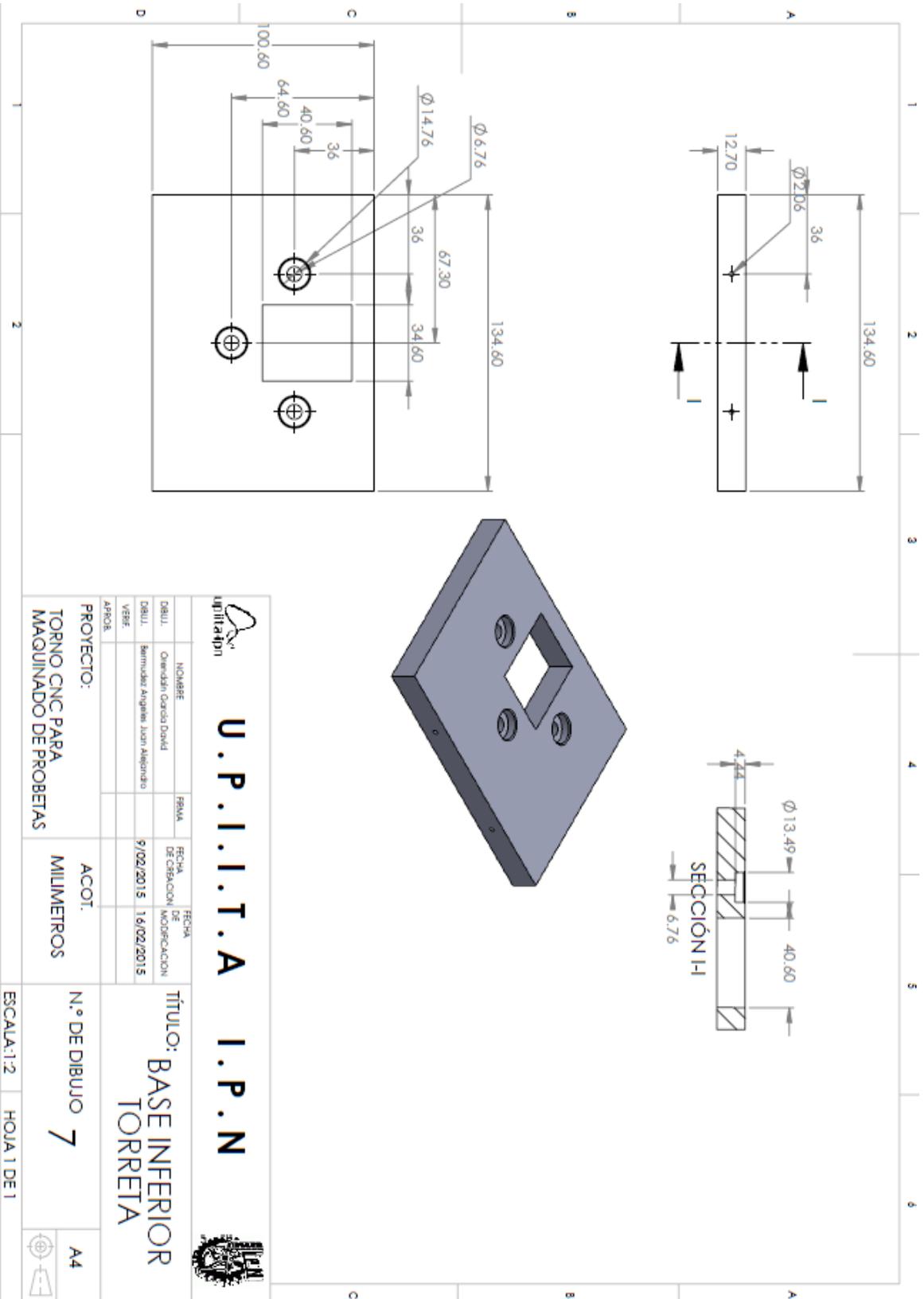
ACOT. MILIMETROS

TÍTULO: BASE PARA MOTOR

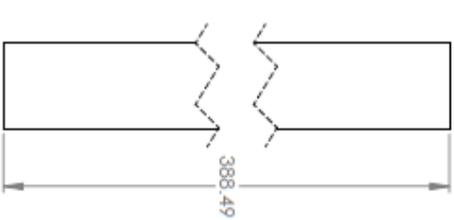
N.º DE DIBUJO 11

ESCALA: 1:5 HOJA 1 DE 1

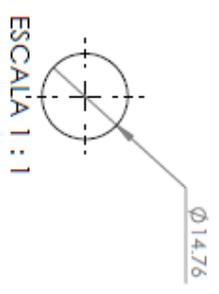




		<b>U.P.I.I.T.A I.P.N</b>			
NOMBRE: Orlando Garcia David	FIRMA:	FECHA DE OBSERVACION:	FECHA DE MODIFICACION:	TÍTULO: BASE INFERIOR TORRETA	N.º DE DIBUJO 7
DBU1: Bernabé Arques Juan Alejandro	DBU2: 	9/02/2015	16/02/2015	ACOT. MILIMETROS	A4
PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS	APROB.:	VERE.:	APROB.:	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

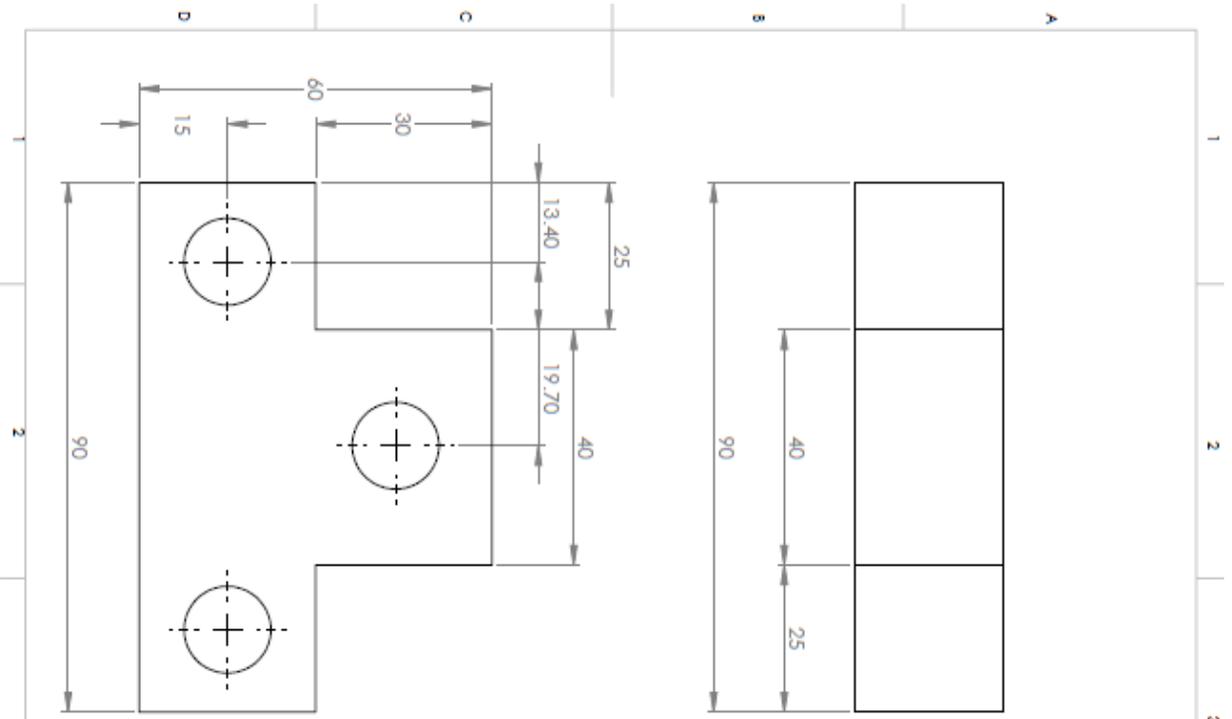


ESCALA 1 : 1



 <b>U.P.I.I.T.A. I.P.N.</b> 															
<table border="1"> <tr> <th>NOMBRE</th> <td>Orendán Orendá David</td> </tr> <tr> <th>PRIMA</th> <td></td> </tr> <tr> <th>FECHA DE CREACION</th> <td>9/02/2015</td> </tr> <tr> <th>FECHA DE MODIFICACION</th> <td>16/02/2015</td> </tr> <tr> <th>DEBIL.</th> <td>Bermudez Angeles Juan Alejandro</td> </tr> <tr> <th>VERIF.</th> <td></td> </tr> <tr> <th>APROB.</th> <td></td> </tr> </table>	NOMBRE	Orendán Orendá David	PRIMA		FECHA DE CREACION	9/02/2015	FECHA DE MODIFICACION	16/02/2015	DEBIL.	Bermudez Angeles Juan Alejandro	VERIF.		APROB.		<b>TÍTULO:</b> <b>BARRA GUIA VERTICAL</b>
NOMBRE	Orendán Orendá David														
PRIMA															
FECHA DE CREACION	9/02/2015														
FECHA DE MODIFICACION	16/02/2015														
DEBIL.	Bermudez Angeles Juan Alejandro														
VERIF.															
APROB.															
<b>PROYECTO:</b> <b>TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS</b>	<b>ACOT:</b> <b>MILIMETROS</b>														
<b>N.º DE DIBUJO</b> <b>9</b>	<b>A4</b>														
<b>ESCALA:</b> 1:5	<b>HOJA 1 DE 1</b>														







**U.P.I.I.T.A**

**I.P.N**

**TÍTULO:**

**BASE MOVIL**



NOMBRE	Orendán David David	FECHA	
DBLU	Barrueta Anguiano Juan Alejandro	FECHA DE CREACION	9/02/2015
VERE		FECHA DE MODIFICACION	16/02/2015
APROB.			

**PROYECTO:** TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS

**ACOT.:** MILIMETROS

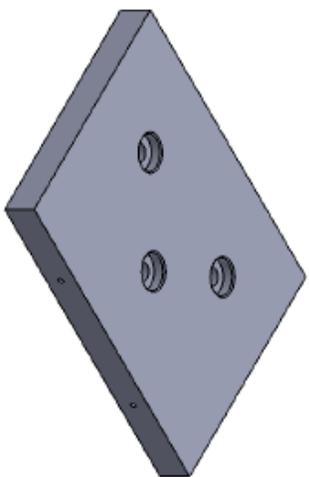
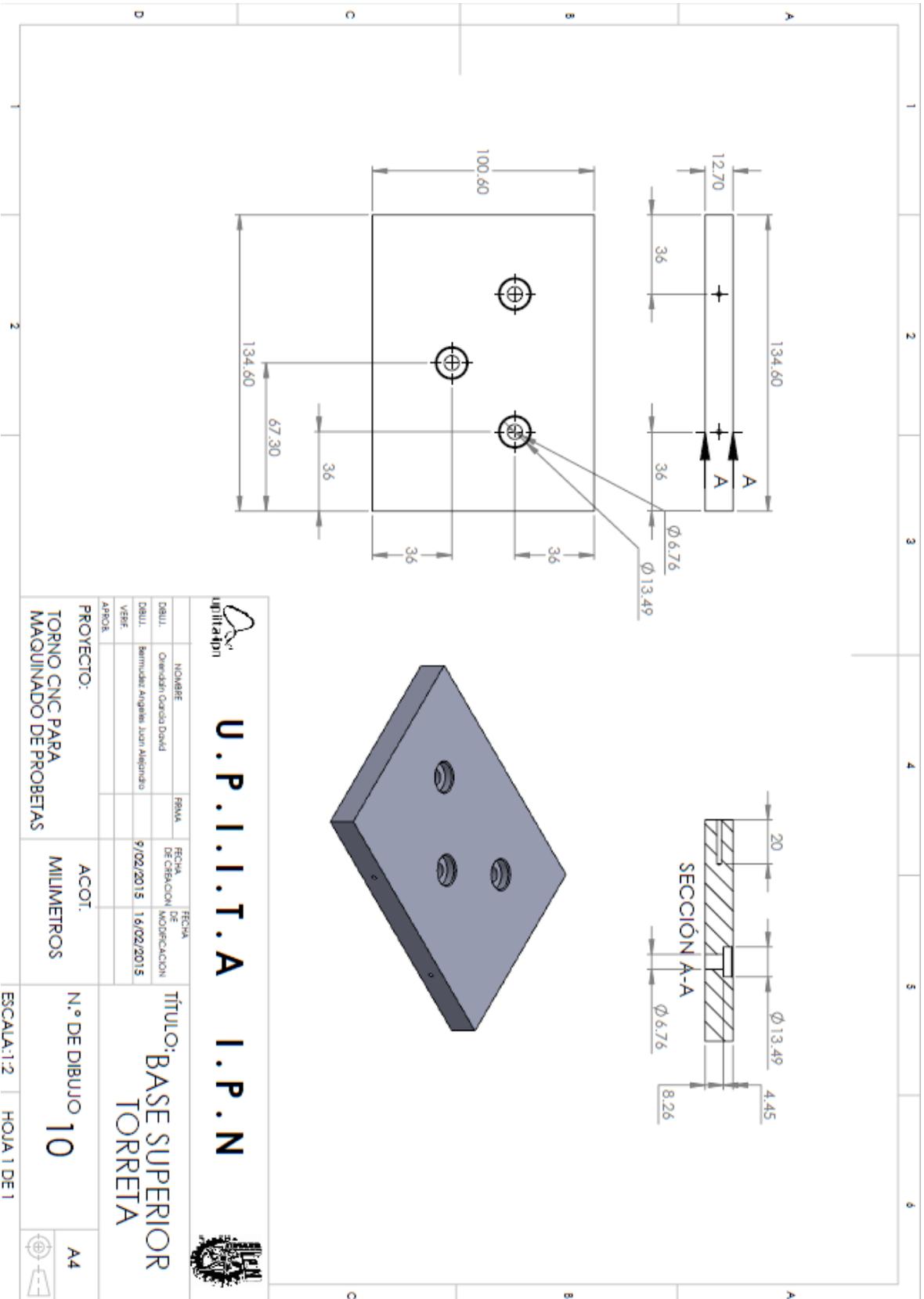
**N.º DE DIBUJO** 5

**ESCALA:** 1:1 | **HOJA** 1 DE 1



A4

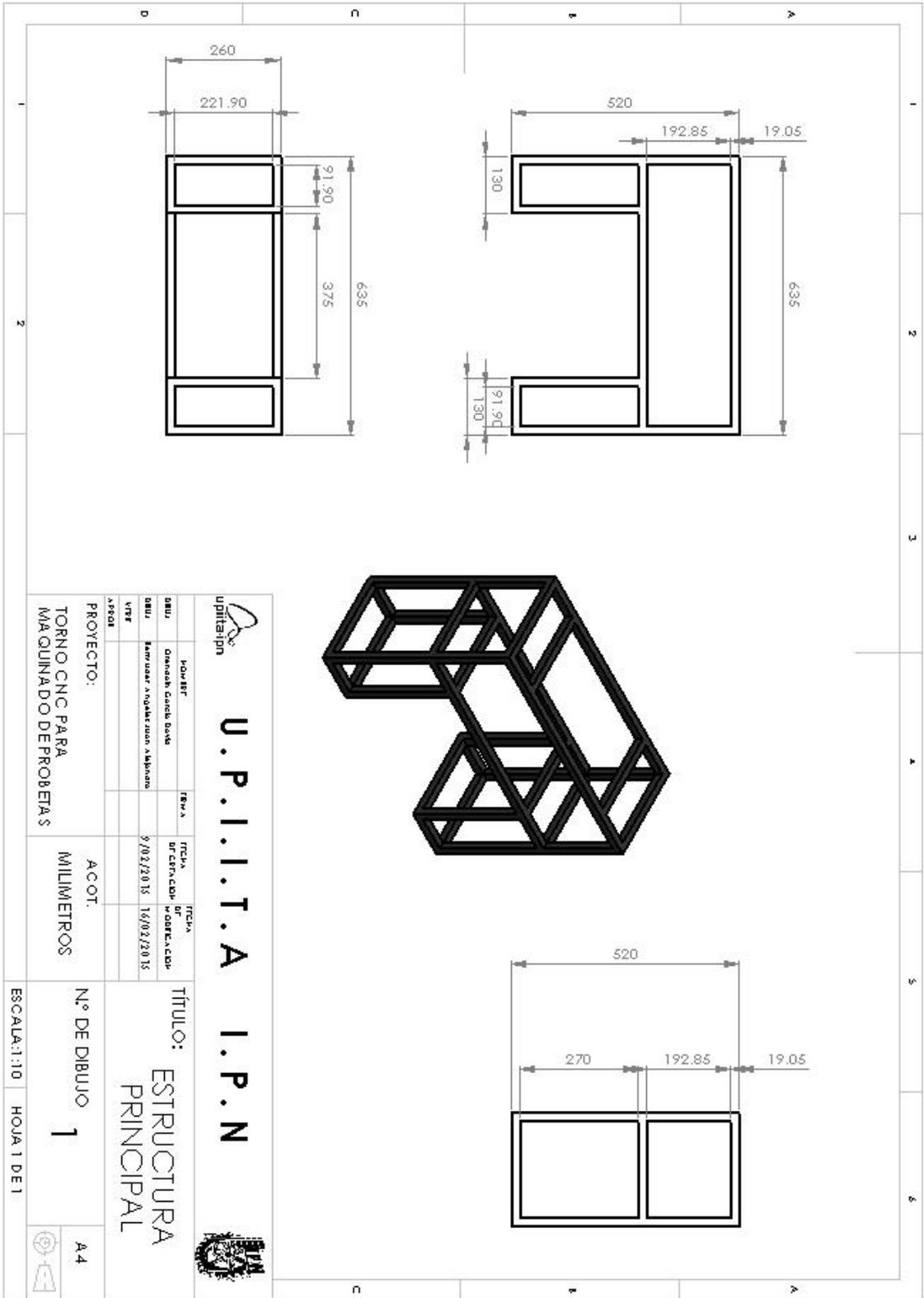


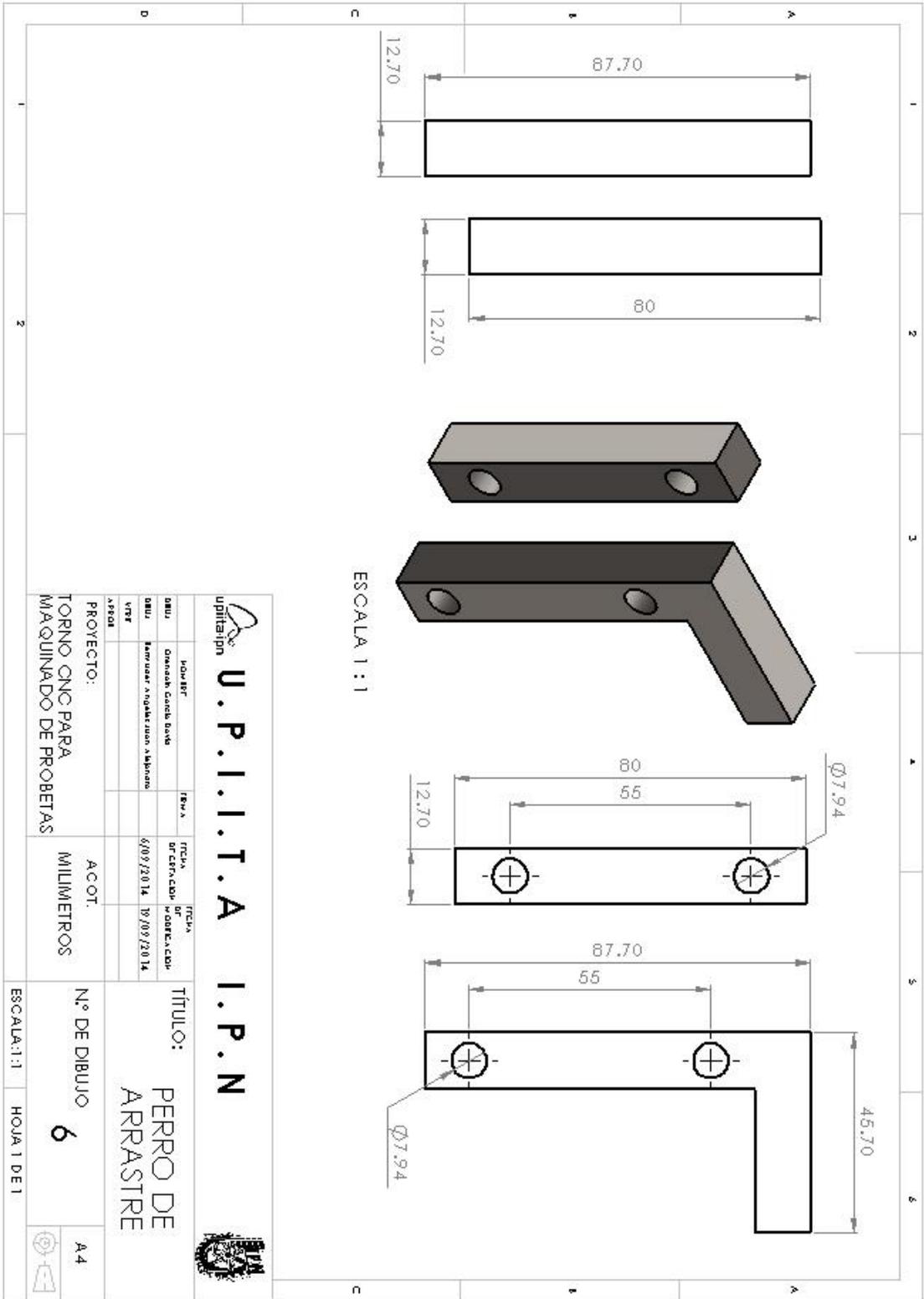



**U.P.I.I.T.A**

**I.P.N**

<b>U.P.I.I.T.A</b>		<b>I.P.N</b>	
NOMBRE Orendán García David	FIRMA	FECHA DE CREACIÓN 9/02/2015	FECHA DE MODIFICACIÓN 16/02/2015
DISEÑO Bermúdez Anguiano Juan Alejandro			
VESER 			
APROB.			
PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS	ACOT. MILIMETROS	TÍTULO: BASE SUPERIOR TORRETA	
		N.º DE DIBUJO <b>10</b>	A4
		ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1





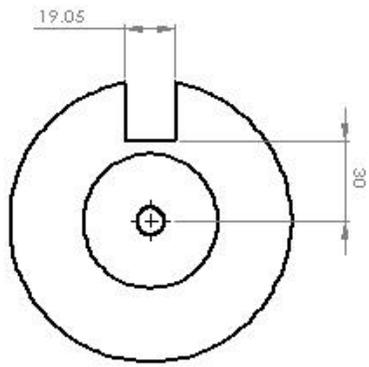
ESCALA 1 : 1


**U.P.I.I.T.A**

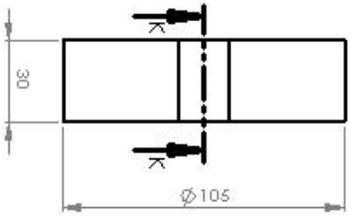

NOBRE	FECHA	FECHA
Orlando Conde Balle	07/09/2014	19/09/2014
DBU	DBU	DBU
20140919	20140919	20140919
VER	VER	VER
1/0001	1/0001	1/0001

PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROJETAS  
 ACOT. MILIMETROS  
 N° DE DIBUJO 6  
 ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 1

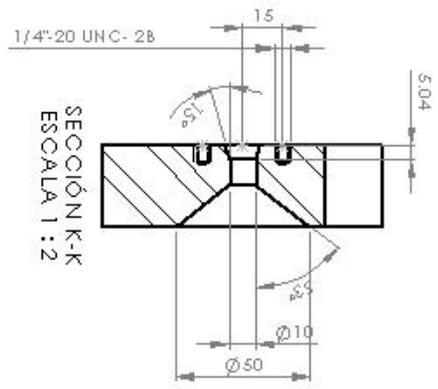




ESCALA 1:2

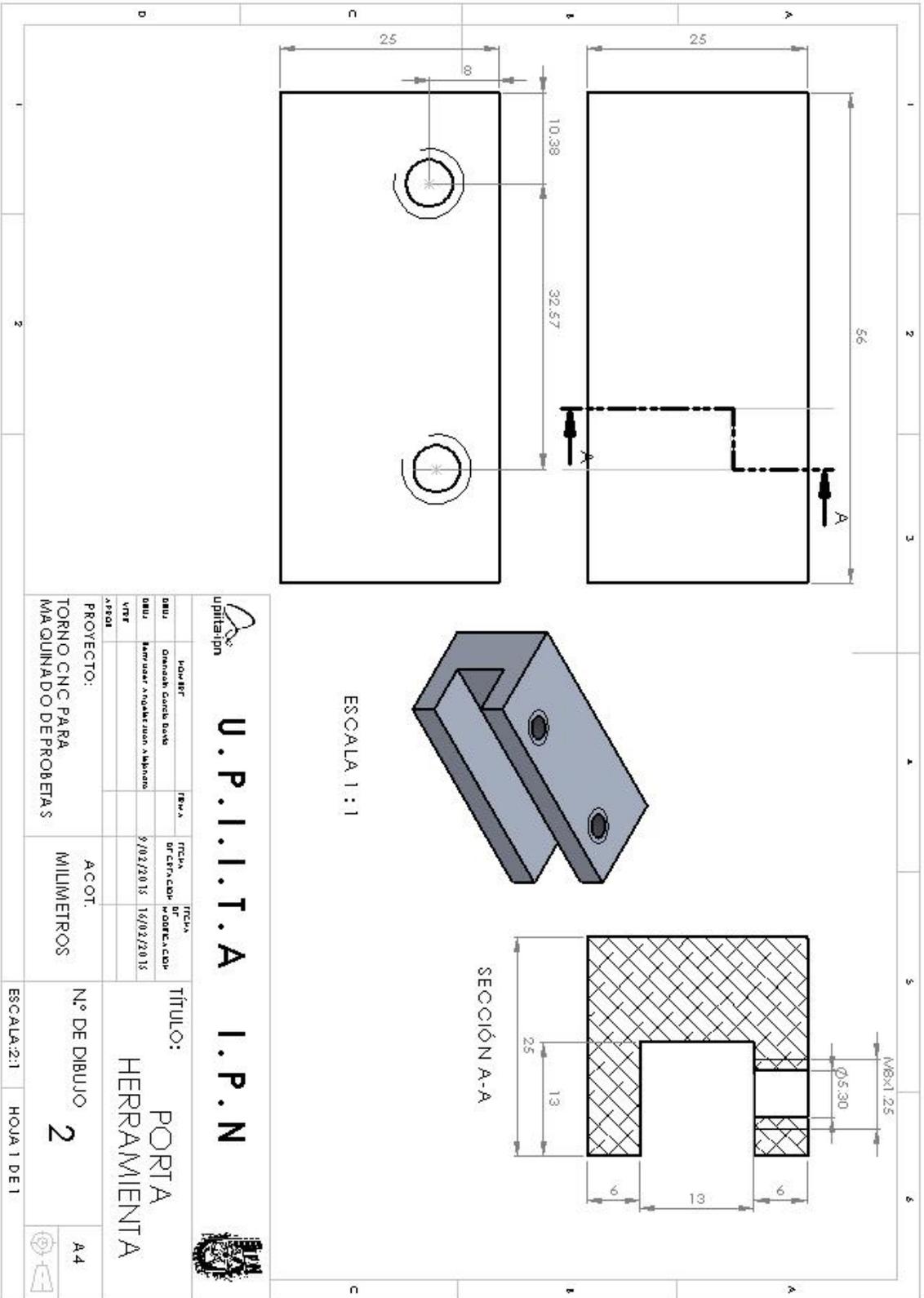


ESCALA 1:2



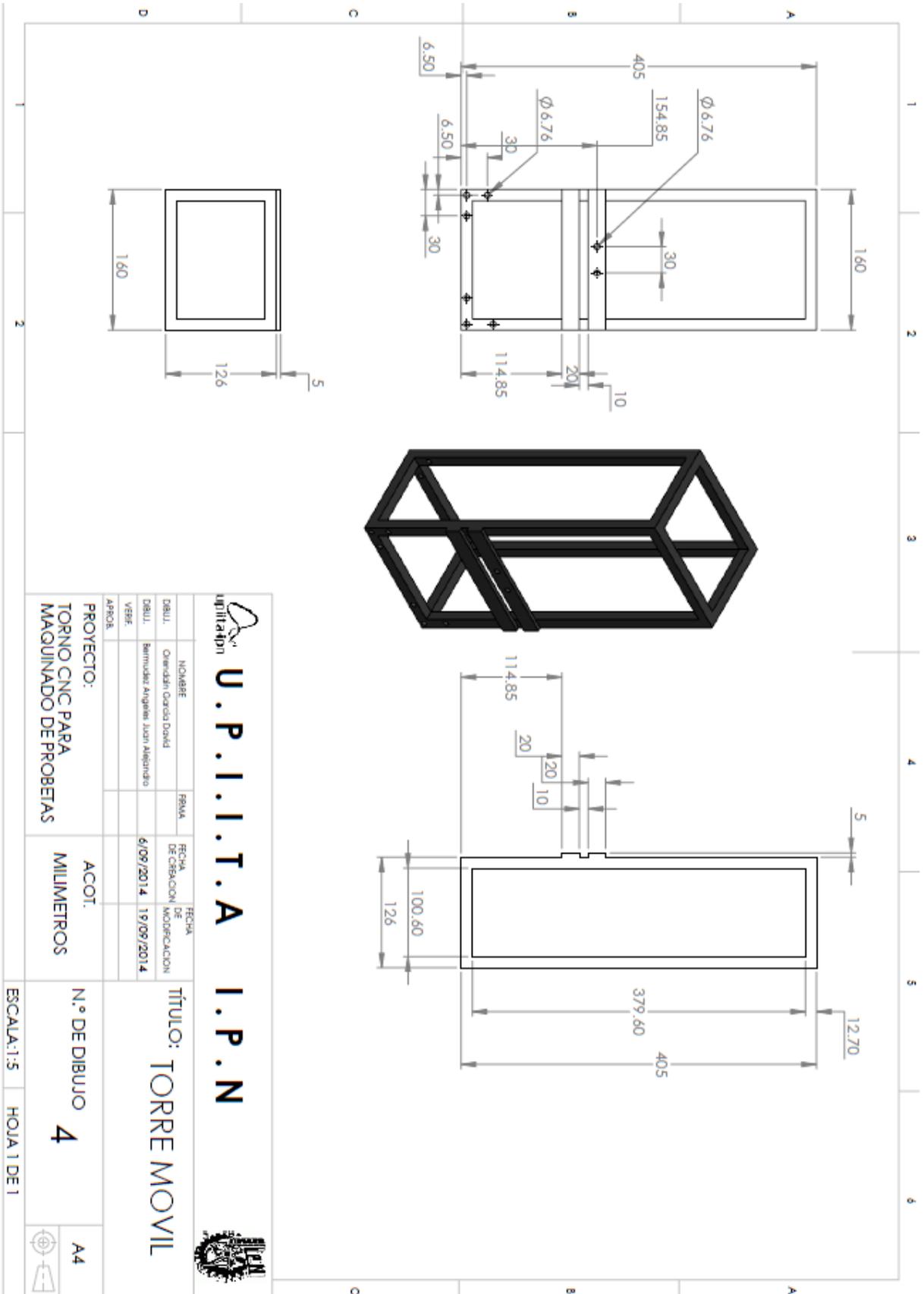
SECCIÓN K-K  
ESCALA 1:2

		<b>U.P.I.I.T.A I.P.N</b>			
NOMBRE: DISEÑADOR: DIBUJANTE: APROBADO:	DISEÑADO: GARCÍA GARCÍA DIBUJADO: MARTÍNEZ ANTONIO APROBADO:	FECHA: 08/09/2014	FECHA: 28/03/2014	TÍTULO: <b>PLATO GIRATORIO</b>	N.º DE DIBUJO: <b>3</b>
PROYECTO: TORNO CNC PARA MÁQUINA DE PROBETAS				ACOT. MILIMETROS	ESCALA: 1:2
				HOJA 1 DE 1	A4



<b>U.P.I.I.T.A I.P.N</b>			
DIBU DIBU VITE APROB	HOW-ART Osmoth Carlo Bava Herramienta para torneado de aluminio	REV. A 2/02/2015 16/02/2015	FECHA DE EMISIÓN DE HERRAMIENTA 16/02/2015
PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROJETAS		ACOT: MILIMETROS	
N° DE DIBUJO <b>2</b>		TÍTULO: PORTA HERRAMIENTA	
ESCALA: 2:1		HOJA 1 DE 1	
		A4	





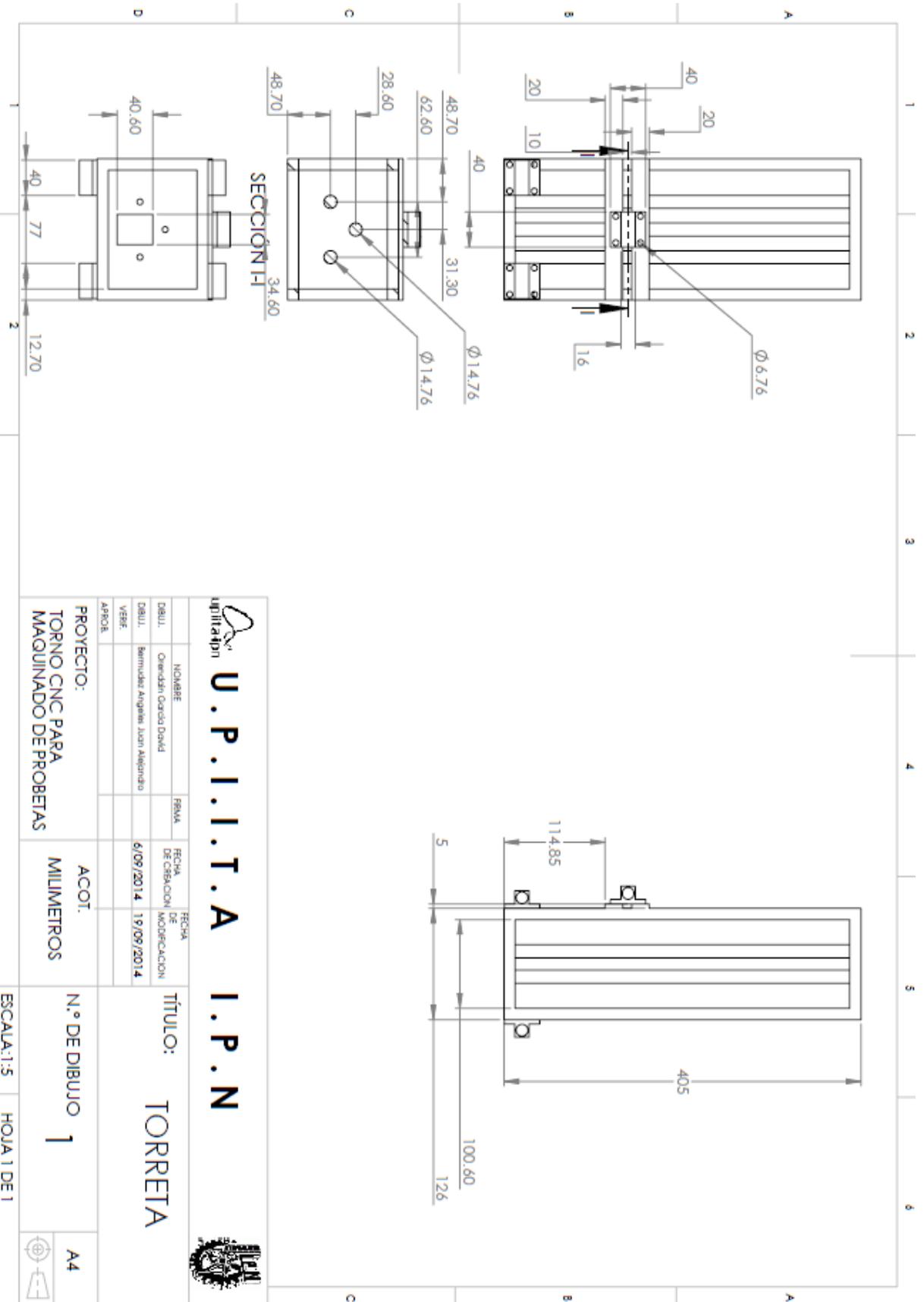

**U.P.I.I.T.A. I.P.N.**


TÍTULO: TORRE MOVIL

NO. DIBUJO	FECHA DE CREACION	FECHA DE MODIFICACION
01	6/09/2014	19/09/2014

DISEÑADOR: Orendain Orendain David  
 DISEÑO: Bermudez Angelier Juan Alejandro  
 VERIFICADO:  
 APROBADO:  
 PROYECTO: TORNO CNC PARA MAQUINADO DE PROBETAS  
 ACOT. MILLIMETROS  
 N.º DE DIBUJO 4  
 ESCALA: 1:5 HOJA 1 DE 1





**U.P.I.I.T.A**

**I.P.N**



NOMBRE	PRUA	FECHA DE CREACION	FECHA DE MODIFICACION
DIBUJ. Overdén García David		6/09/2014	19/09/2014
DIBUJ. Bermudez Angeles Juan Alejandro			
VERIF.			
APROB.			

TÍTULO: **TORRETA**

PROYECTO:  
TORNO CNC PARA  
MAQUINADO DE PROBETAS

ACOT.  
MILIMETROS

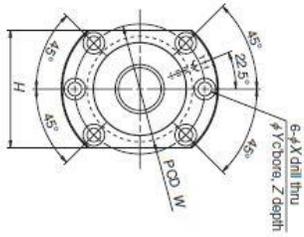
N.º DE DIBUJO **1**

A4

ESCALA: 1:5 | HOJA 1 DE 1

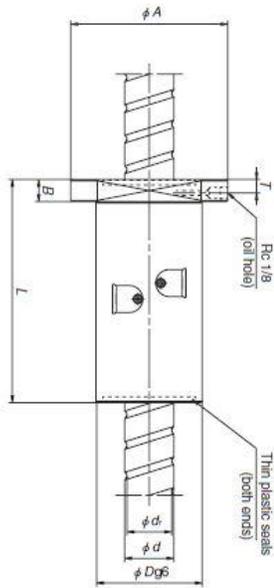


**Anexo. Hojas de datos y tablas de especificaciones.**



Model No.	Shaft dia. $d$	Lead $l$	Root dia. $d_r$	Basic load rating (N)		Axial rigidity $K$ (N/μm)
				Dynamic $C_d$	Static $C_{0d}$	
<b>EM4016-4E</b>	40	16	34.1	57 100	130 000	1 020
<b>EM4020-6E</b>		20	34.4	66 900	165 000	1 340
<b>EM4025-6E</b>		25	34.1	79 100	191 000	1 370
<b>EM4030-6E</b>		30	34.1	79 100	191 000	1 350
<b>EM4516-4E</b>	45	16	39.1	59 600	145 000	1 050
<b>EM4520-6E</b>		20	39.4	69 100	168 000	1 470
<b>EM4525-6E</b>		25	39.1	82 500	213 000	1 510
<b>EM5016-4E</b>		16	44.1	61 800	160 000	1 150
<b>EM5020-6E</b>	50	20	44.4	73 200	206 000	1 600
<b>EM5025-6E</b>		25	44.1	85 600	235 000	1 620
<b>EM5030-6E</b>		30	44.1	85 600	235 000	1 630
<b>EM6316-4E</b>		63	16	55.2	111 000	339 000

Notes: 1. The right turn screw is the standard. Please consult NSK for left turn screws.  
2. Rigidity listed under the column K is the value when a 5% of basic dynamic load rating is applied as the preload.



Nut length $L$	Ball nut dimensions					Ball hole size			Oil hole position $T$	Max. feeding speed (m/min)	
	Nut dia. $D$	Flange dia. $A$	Flange width $B$	Flange size $H$	$X$	$Y$	$Z$	PCD $W$			
180	86	128	18	96	11	17.5	11	106	11	64	
150										80	
182										100	
213	92	134	18	102	11	17.5	11	112	11	120	
160										56	
150										70	
182	180	140	18	107	11	17.5	11	118	11	88	
150										64	
182										80	
213	170	122	180	28	138	18	26	17.5	150	14	96
170											40

Unit: mm

Features	Bearing Types	Load Capacity		
		Radial Loads	Axial Loads	Combined Loads
Deep Groove Ball Bearings				
Mounted Bearings				
Angular Contact Ball Bearings				
Double-row Contact Ball Bearings				
Double-row Contact Ball Bearings				
Four Point Ball Bearings				
Self-aligning Ball Bearings				
Cylindrical Roller Bearings				
Double-row Roller Bearings with Single Rib				
Cylindrical Roller Bearings with Single Rib				

Excellent   
 Good   
 Fair   
 Poor   
 Impossible   
 One direction only   
 Two directions

☆ Applicable   
 ★ Applicable, but it is necessary to allow shaft contraction/elongation at fitting surfaces of bearings.

Features	Bearing Types	Load Capacity		
		Radial Loads	Axial Loads	Combined Loads
Cylindrical Roller Bearings with Thrust Ribs				
Needle Roller Bearings				
Tapered Roller Bearings				
Double and Triple Row Tapered Roller Bearings				
Spherical Roller Bearings				
Thrust Ball Bearings				
Thrust Ball Bearings with Aligning Spline				
Thrust Double Row Angular Thrust Ball Bearings				
Thrust Roller Bearings				
Thrust Roller Bearings				
Thrust Roller Bearings				

☆ Applicable   
 ★ Applicable, but it is necessary to allow shaft contraction/elongation at fitting surfaces of bearings.

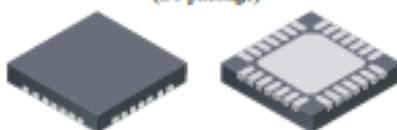
## DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

### Features and Benefits

- Low  $R_{DS(ON)}$  outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , and  $1/16$

### Package:

28-contact QFN  
with exposed thermal pad  
5 mm × 5 mm × 0.90 mm  
(ET package)



Approximate size

### Description

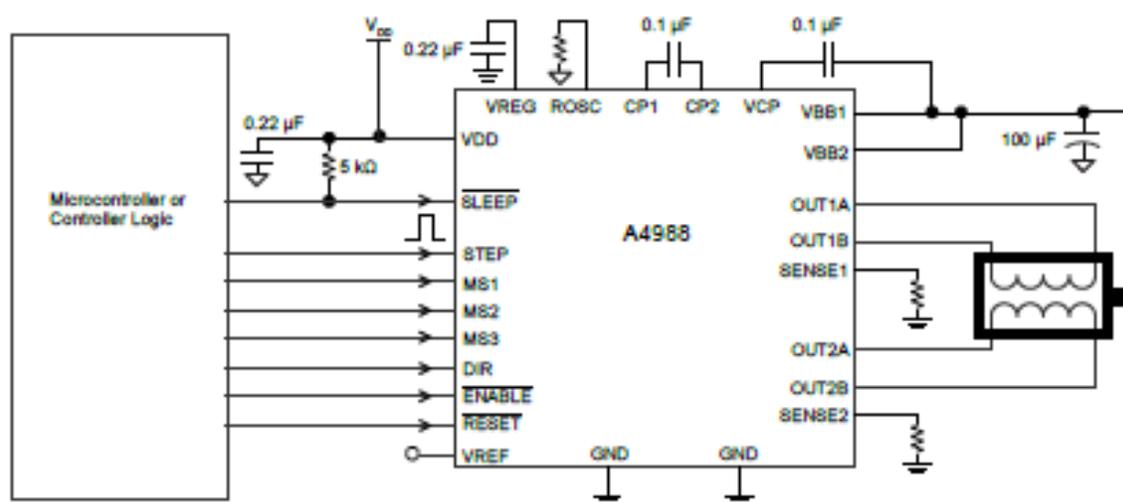
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and  $\pm 2$  A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

*Continued on the next page...*

### Typical Application Diagram



4988-DG, Rev. 5



# MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

## 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

### Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

### Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8  $\mu$ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1  $\mu$ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1  $\mu$ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1  $\mu$ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

### Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
  - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
  - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown if any clock stops

### Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
  - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns (Tcy/16)
  - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns (Tcy)
  - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
  - Multiple output modes
  - Selectable polarity
  - Programmable dead time
  - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
  - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I<sup>2</sup>C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

### Special Microcontroller Features:

- C Compiler Optimized Architecture with optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I <sup>2</sup> C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3



# Referencias

- Ada Gabriela Cabrales García, R. R. (Septiembre de 1997). *Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías*. Obtenido de Universidad de Guadalajara: <http://proton.ucting.udg.mx/expodec/sep97/14/14.html>
- Blupert Design. (2008). *Coples Flexibles*. Obtenido de BARMEX: [http://www.barmex.com.mx/home\\_coplerig.htm](http://www.barmex.com.mx/home_coplerig.htm)
- Castillo, A. A. (Marzo de 2004). *Generalidades de Manufactura CNC*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs\\_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/TEORIA/GENERALIDADES%20CNC/GENERALIDADES%20CNC.pdf](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/TEORIA/GENERALIDADES%20CNC/GENERALIDADES%20CNC.pdf)
- CINVESTAV. (11 de Febrero de 2015). *¿Qué es Mecatrónica?* Obtenido de Sección de Mecatrónica. CINVESTAV: <http://www.meca.cinvestav.mx/quees.html>
- Correa, J. A. (Abril de 2008). *Principios de Torneado*. Obtenido de Colegio Provincial de Educación Tecnológica Río Grande: <http://www.epetrg.edu.ar/apuntes/principiosdetorneado.pdf>
- Cruz, J. A. (15 de Septiembre de 2011). *Escuela Politécnica Superior*. Obtenido de Universidad Autónoma de Madrid: [http://arantxa.ii.uam.es/~gdrivera/varios/notas\\_lpt.htm](http://arantxa.ii.uam.es/~gdrivera/varios/notas_lpt.htm)
- ElPrisma. (marzo de 2014). *ElPrisma*. Obtenido de [http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria\\_mecanica/tornoparalelo/default2.asp](http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/tornoparalelo/default2.asp)
- F.Krar Steve, G. A. (2009). *Tecnología de las Maquinas Herramienta*. Mexico,D.F: Alfaomega.
- Fabien CHEVALIER, S. R. (Abril de 2003). *Le protocole USB*. Obtenido de Documentation USB: <http://www.rennes.supelec.fr/ren/fi/elec/docs/usb/usb.html>

*FANUC America*. (2015). Obtenido de FANUC America Corporation:  
<http://www.fanucamerica.com/>

*G & M Codes*. (Febrero de 2015). Obtenido de HSMWorks:  
[http://www.hsmworks.com/docs/cncbook/en/#Ch05\\_GMCodes](http://www.hsmworks.com/docs/cncbook/en/#Ch05_GMCodes)

Grupo CUPRUM. (Febrero de 2015). *CUPRUM. Perfiles - Tubo cuadrado*. Obtenido de CUPRUM. Metales Laminados:  
<http://cuprummetaleslaminados.com/Productos/Acero-Inoxidable/Perfiles/Tubo-Cuadrado>

*Ingeniería de Sistemas Educativos*. (25 de Agosto de 2014). Obtenido de  
<http://www.aprendizaje.com.mx/curso/proceso2/practicas/torno-desarrollo/capi8.htm>

Instituto Politécnico Nacional. (2015). Obtenido de CIITEC - IPN: <http://www.ciitec.ipn.mx/>

*LZQ*. (2008). Obtenido de <http://www.lzqtool.com/>

*Mastercam CAD-CAM Software*. (Febrero de 2015). Obtenido de CNC Software, Inc.:  
<http://www.mastercam.com/en-us/>

*Metal Lathes | eBay*. (21 de Febrero de 2015). Obtenido de eBay:  
<http://www.ebay.com/sch/Metalworking-Lathes-/97230/i.html>

Microchip Technology Inc. (2014). *PIC18F4550 - 8-bit PIC Microcontrollers*. Obtenido de Microchip:  
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PIC18F4550>

*Motores a Pasos*. (Febrero de 2015). Obtenido de Universidad de las Américas Puebla:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_b\\_ii/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo3.pdf)

NSK Ltd. (2015). *Tornillos de bolas | Componentes de máquina de precisión*. Obtenido de NSK Global: <http://www.nsk.com/products/precisionmachine/ballscrew/#tab2>

- Ochoa, A. (Abril de 2014). *es.scribd.com*. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/90511679/ENSAYO-DE-TRACCION-EN-COBRE-LATON-Y-ALUMINIO>
- Quetzalcoatl, P. (2015). *proton ucting*. Obtenido de <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/tesis/quetzal/>
- RAE. (Octubre de 2014). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de Real Academia Española.: <http://lema.rae.es/drae/>
- Romeva, C. R. (2002). *Diseño concurrente*. Barcelona: Edicions UPC.
- Sanvik Coromant. (2015). *ISO H Acero templado*. Obtenido de Materiales Sanvik Coromant: [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_h\\_hardened\\_steel/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_h_hardened_steel/pages/default.aspx)
- Schneider Electric. (2015). *Quick Reference*. Obtenido de Schneider Electric Web site: <http://motion.schneider-electric.com/downloads/quickreference/NEMA23.pdf>
- Teruel, F. C. (2009). *Control Numerico y programacion*. Mexico D.F.: Alfa Omega.
- UBA-FI. (marzo de 2014). *Control Numerico por computadora*. Obtenido de Universidad de Buenos Aires Facultad de Ingenieria: <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numerico-por-computadora.pdf>
- UNAC. (marzo de 2014). *Informes Finales de Investigacion*. Obtenido de Universidad Nacional del Callao: [http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes\\_Finales\\_Investigacion/Abril\\_2011/IF\\_LOAYZA\\_FIME/RESUMEN\\_INTR\\_MATER\\_RESUL.PDF](http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Abril_2011/IF_LOAYZA_FIME/RESUMEN_INTR_MATER_RESUL.PDF)
- Unite Motor. (2013). *Traction Motor*. Obtenido de ZheJiang Unite Motor Co., Ltd.: <http://www.unitemotor.com/en/productmin.htm>
- USB Implementers Forum, Inc. (2015). *USB*. Obtenido de USB.org: <http://www.usb.org/>

Valencia, A. (1992). *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*. Obtenido de Tratar. Tratamientos Térmicos.: <http://www.tratar.com.co/descargas/acero.pdf>

Vandelvira, A. d. (Noviembre de 2011). *Motores de Corriente Alterna*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado: [http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/leva/introduccion\\_motores\\_ca.pdf](http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/leva/introduccion_motores_ca.pdf)