

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY.
DIVISION DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.

DISEÑO MECÁNICO DE PRECISIÓN PARA
SISTEMAS DE MICRO Y MESO MANUFACTURA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

EDGAR ALBERTO DOMÍNGUEZ ROMERO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2010

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

**DISEÑO MECÁNICO DE PRECISIÓN PARA
SISTEMAS DE MICRO Y MESO MANUFACTURA**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

EDGAR ALBERTO DOMÍNGUEZ ROMERO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2010

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**DISEÑO MECÁNICO DE PRECISIÓN PARA SISTEMAS DE MICRO Y
MESO MANUFACTURA**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

EDGAR ALBERTO DOMÍNGUEZ ROMERO

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE 2010

Dedicatoria

*Para mis padres Rosalba y Alberto, hermanos
Amanda y Kristiam, y novia Beatriz.... son mi
motor y mi todo.*

Agradecimientos

Al Dr. Horacio Ahuett por su orientación, enseñanzas y consejos durante mis estudios de maestría, tanto en el ámbito profesional como en el personal.

A mis sinodales M.Sc. Abiud Flores y Dr. David Hernández por su apoyo en la realización de este trabajo de grado.

A mis padres Rosalba y Alberto por apoyarme en cada una de las etapas de mi vida, su amor incondicional, sus enseñanzas y la formación que forjó cada una de mis virtudes.

A mi hermano y embajador de “kwan” Kristiam por estar siempre a mi lado y apoyarme sin dudar.

A mi hermanita menor Amanda por alegrar la vida de los que conformamos esta familia, desde el momento en que comenzó a existir.

Un agradecimiento especial al amor de mi vida Beatriz Montoya, por su amor, confianza, apoyo y comprensión cuando me ausenté.

A todos mis compañeros de trabajo; Oscar, Servando, Jesús, Adrian, Sergio, Luis, Hugo, Alejandro, Agustín. Gracias por su apoyo y confianza.

Un agradecimiento a la cátedra de micro máquinas por la oportunidad de colaborar, y al departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Monterrey.

Índice de contenido

Capítulo I. Introducción	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Motivación y justificación	12
1.3 Temas de investigación	14
1.3.1 Precisión	14
1.3.2 Matrices homogéneas de transformación (HTM)	15
1.4 Objetivos	17
1.5 Alcances	18
1.5.1 Posicionador	18
1.5.2 Sensor	18
Capítulo II. Posicionador lineal vertical para máquina de micro EDM	19
2.1 Antecedentes del posicionador	19
2.2 Revisión bibliográfica	20
2.3 Sistemas comerciales de posicionadores lineales	22
2.4 Arquitectura del posicionador	23
2.5 Metodología de diseño	24
2.6 Diseño	25
2.6.1 Descomposición funcional	25
2.6.2 Matriz morfológica y desarrollo de conceptos	26
2.6.3 Matriz de decisión	29
2.7 Construcción y validación de la estructura mecánica	30
2.7.1 Base	30
2.7.2 Poleas y banda	32
2.7.3 Tornillo de potencia	33
2.7.4 Guías tipo Cola de Milano (Dovetail)	33
2.7.5 Tuerca flexible	34
2.7.6 Tuerca flexible de aluminio con vigas en "U" [T1]	36
2.7.7 Tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce de vigas semicirculares [T2]	37
2.7.8 Prensa	40
2.7.9 Diseño final del posicionador	41
2.8 Cálculos de propagación de error	42
2.8.1 Definición de los sistemas de coordenadas del posicionador vertical	44
2.8.3 Cálculo de errores por desviaciones mecánicas de la estructura	44
2.8.4 Cálculo de la matriz homogénea de rotación (HTM)	45
2.9 Caracterización experimental	49
2.10 Pruebas al posicionador lineal	50
2.10.1 Resultados de la tuerca flexible de aluminio	51
2.10.2 Resultados con la tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce	57
2.10.3 Pruebas del posicionador presentado en [García, 2010]	61
2.11 Discusión	64
2.12 Conclusiones	65
Capítulo III. Sensor de posición basado en el principio de interferometría láser	66
3.1 Antecedentes del sensor de posición	66
3.2 Sistemas comerciales de interferómetros de Michelson	67
3.3 Revisión bibliográfica	69
3.3.1 Análisis de patentes	71
3.4 Arquitectura del sensor de posición	73
3.5 Metodología de diseño	74
3.6 Diseño de la estructura mecánica	75
3.6.1 Descomposición funcional	75
3.6.2 Matriz morfológica, desarrollo de conceptos	76
3.6.3 Matriz de decisión	78
3.7 Construcción y validación del sistema mecánico	79
3.7.1 Placa	80
3.7.2 Guías	80

3.7.3 Soporte del láser	81
3.7.4 Soporte del separador de haz.....	81
3.7.5 Soporte porta objetivo.....	81
3.7.6 Soporte del arreglo de fototransistores	81
3.7.7 Tornillo.....	82
3.7.8 Chumaceras	82
3.7.9 Rodamientos	82
3.7.10 Porta espejo flexible	82
3.8 Cálculo de la matriz homogénea de transformación	87
3.9 Diseño final del sensor de posición.....	90
3.10 Pruebas al sensor de posición	90
3.11 Resultados	91
3.12 Discusión.....	92
Conclusiones	94
Capítulo IV. Conclusiones generales y trabajo futuro	95
4.1 Conclusiones generales.....	95
4.2 Trabajo futuro	95
Posicionador.....	95
Sensor de posición	96
Referencias.....	98
APÉNDICE A- PLANOS DE FABRICACIÓN DEL POSICIONADOR VERTICAL	
LINEAL	102
APÉNDICE B- PLANOS DE FABRICACIÓN DEL SENSOR DE POSICIÓN.....	109
APÉNDICE C- GRÁFICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS TUERCAS	
FLEXIBLES.....	119
APÉNDICE D- PROGRAMA INTERFASE LABVIEW POSICIONADOR VERTICAL	
.....	124

Índice de Figuras

Figura 1. Rangos de dimensiones de micro/meso sistemas [Koernel, 2006].	11
Figura 2. Relación entre el volumen de la maquinaria y las piezas fabricadas.	12
Figura 3. Esquemático de 6 componentes de error de movimiento de un carro de una máquina herramienta.	15
Figura 4. Posicionador construido por [García, 2010].	19
Figura 5. Esquemático del motor compuesto por elementos magnetostrictivos [Kim, 2003].	21
Figura 6. Arquitectura del posicionador.	24
Figura 7. Descomposición funcional	25
Figura 8. (a) Análisis de desplazamientos (b) Análisis de esfuerzos. Base general y soportes triangulares sometidos a un cambio de temperatura de 25 a 25.1°C.	32
Figura 9. (a) Porta tuerca (b) cuña de bronce pre lubricado (c) Guía tipo Cola de Milano.	34
Figura 10. Tuerca flexible anti-juego sobre un porta tuerca.	34
Figura 11. (a) Tuerca con vigas de unión en "U" (b) Tuerca de aluminio con inserto de bronce de vigas de unión "Semicirculares".	35
Figura 12. Análisis de esfuerzos de la tuerca flexible de aluminio en COMSOL®.	36
Figura 13. Metodología para caracterizar un elemento flexible presentada en [Flores, 2006].	38
Figura 14. Tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce.	39
Figura 15. Prensa y tanque del posicionador.	40
Figura 16. (a) Último diseño del posicionador (b) Diseño de [García, 2010].	41
Figura 17. Errores potenciales del posicionador.	43
Figura 18. Sistemas coordenados del posicionador.	44
Figura 19. Plano de la base general	45
Figura 20. Error máximo permitido debido a tolerancia de perpendicularidad	45
Figura 21. Coordenadas del punto P con respecto al sistema de coordenadas 1.	46
Figura 22. Coordenadas sistema de {1} con respecto al sistema de coordenadas {R}.	47
Figura 23. Diagrama de bloques del montaje experimental.	49
Figura 24. Elementos de medición para pruebas.	50
Figura 25. Bloqueo de tuerca flexible.	51
Figura 26. Gráfica pasos del "encoder" contra pasos de motor [T1, P1, S].	52
Figura 27. Gráfica medición del LVDT en mm contra pasos de motor [T1, P2, S].	53
Figura 28. Errores de geometría debido a imprecisión en el maquinado.	53
Figura 29. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor en mm (en posición lateral).	54
Figura 30 Errores en la prueba [T1, P1, S].	55
Figura 31. Gráfica pasos registrados en el "encoder" contra pasos de motor con bloqueo de la tuerca flexible [T1, P1, C].	56
Figura 32. Gráfica medición LVDT en mm contra de pasos del motor con bloqueo de tuerca flexible [T1, P2, C].	57
Figura 33. Gráfica pasos del "encoder" contra medición de pasos del motor [T2, P1, S].	58
Figura 34. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor [T2, P2, S].	59
Figura 35. Gráfica medición de pasos del "encoder" contra pasos del motor [T2, P1, C].	60
Figura 36. Grafica medición del LVDT contra pasos del motor. [T2, P2, C].	61
Figura 37. Gráfica de posición en mm y pasos del motor con tuerca convencional por [García, 2010].	62
Figura 38. Gráfica de posición en mm y pasos del motor con tuerca flexible.	63
Figura 39. Interferómetro para pruebas, empleando componentes comerciales.	66
Figura 40. Pulsos registrados en el osciloscopio.	67
Figura 41. Dispositivo de uso frecuente para alineaciones de espejos.	68
Figura 42. Arquitectura del sensor de posición.	74
Figura 43. Descomposición funcional del sensor.	75
Figura 44. Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson.	80
Figura 45. Diagrama CAD del diseño del interferómetro de Michelson.	80

Figura 46. Soporte del arreglo de fototransistores	82
Figura 47. Porta espejo flexible	83
Figura 48. Cartucho flexible de nylamid.	84
Figura 49. Actuación de los tornillos sobre los cartuchos flexibles porta espejo	85
Figura 50. Análisis de esfuerzos von Misses llevado a cabo al elemento flexible en COMSOL ®.....	86
Figura 51. Rango de movimiento del espejo.	86
Figura 52. Sistemas de referencias del cartucho flexible.....	87
Figura 53. Representación de los desplazamientos inducidos para el análisis FEA.....	88
Figura 54. Prototipo del sensor de posición basado en interferometría láser.	90
Figura 55. Montaje para prueba.....	91
Figura 56. Señales obtenidas con montaje mecánico propuesto.....	91
Figura 57. Comparación entre patrones de interferencia, a) Patrón obtenido con montaje propuesto y led-láser, b) Patrón obtenido con montaje comercial y láser de gas.	92
Figura 58. Comparación del precio de (a) Interferómetro realizado y (b) Interferómetro compuesto por elementos comerciales.	93
Figura 59. Efecto de la desalineación de guías: a) Frentes de onda alineados b) Frentes de onda desalineados.....	94
Figura 60. Diseño de los ejes “X” y “Y” de la máquina de μ EDM.	96
Figura 61. Rediseño posible de actuadores en el porta espejo flexible.....	97

Índice de tablas

Tabla 1. Componentes geométricas del error de un eje de un centro de maquinado. ..	16
Tabla 2. Comparación de posicionadores de referencia	22
Tabla 3. Precios de sistemas comerciales de posicionadores lineales.	23
Tabla 4. Matriz morfológica del posicionador vertical.	26
Tabla 5. Concepto 1 del diseño del posicionador.	27
Tabla 6. Concepto 2 del diseño del posicionador	28
Tabla 7. Concepto 3 del diseño del posicionador	29
Tabla 8. Matriz de decisión acerca del diseño del posicionador.	30
Tabla 9. Deformaciones causadas por expansión térmica no uniforme de los componentes del posicionador.	32
Tabla 10. Posición deseada y error del punto {P}.	48
Tabla 11. Resolución del motor, “encoder” y porta tuerca.	52
Tabla 12. Comparación de resultados de las diferentes tuercas.	63
Tabla 13. Análisis de mercado de interferómetros de medición láser.	67
Tabla 14. Otros componentes comerciales de uso común para interferómetros.	69
Tabla 15. Tabla resumen de revisión bibliográfica.	71
Tabla 16. Resumen de patentes.	72
Tabla 17. Matriz morfológica del sensor de posición.	76
Tabla 18. Concepto 1 del diseño del sensor.	77
Tabla 19. Concepto 2 del diseño del sensor.	77
Tabla 20. Concepto 3 del diseño del sensor.	78
Tabla 21. Matriz de decisión del sensor.	79
Tabla 22. Desplazamientos de los puntos 1 y 2 del cartucho flexible.	86
Tabla 23. Desplazamientos ideales y desplazamientos reales del cartucho flexible	89

Nomenclatura

<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing Materials</i>
<i>EDM</i>	<i>Electroerosión (Electrodischarge machining)</i>
<i>Encoder</i>	<i>Codificador</i>
<i>LVDT</i>	<i>Transformador variable diferencial lineal (Linear variable differential transformer)</i>
<i>mm</i>	<i>Milímetros</i>
<i>μm</i>	<i>Micrómetros</i>
<i>μ-EDM</i>	<i>Micro electroerosión (Micro electrodischarge machining)</i>
<i>N</i>	<i>Newton</i>
<i>Plg</i>	<i>Pulgadas</i>
<i>Pa</i>	<i>Pascal</i>
<i>PZT</i>	<i>Piezoeléctrico</i>
<i>UNC</i>	<i>Rosca unificada corriente</i>
<i>UNF</i>	<i>Rosca unificada normal</i>
<i>WEDM</i>	<i>Electroerosión por hilo (Wire Electro Discharge Machining)</i>

Capítulo I. Introducción

1.1 Antecedentes

El análisis de mercado para microsistemas muestra una tendencia al crecimiento del índice de los 30,000 MDD del año 2000 a 65,000 MDD al año 2005. La aplicación de los microsistemas comprende diversas áreas como la mecánica, salud, comunicaciones, energía y electrónica. Ejemplos de estos son los rodamientos de máquinas, engranajes, tornillos de bola, partes de compresores rotatorios, válvulas, así como también prismas, fibras y escalas ópticas por mencionar algunos. Las expectativas son de 1,614 MDD para el año 2015 para el mercado de reemplazos como por ejemplo: reducción de máquinas ya existentes como robots industriales, máquinas herramientas y equipos de manufactura. Por otra parte se esperan 1,875 MDD para nuevos mercados como micro plantas químicas, aplicaciones del hogar y equipo para reciclaje [Koernel, 2006].

Se consideran micro y meso sistemas aquellos cuyas dimensiones críticas son del orden de los 100 μm a los 10 mm, como se ve en la Figura 1.



Figura 1. Rangos de dimensiones de micro/meso sistemas [Koernel, 2006].

La fabricación de elementos miniatura requiere de máquinas capaces de rendir tolerancias ajustadas, figuras complejas y buenos acabados superficiales, además de poder maquinar metales con un alto grado de dureza. Por si fuera poco, estos parámetros no deben aumentar el costo

considerablemente para poder ser competitivas en el mercado. Las máquinas para producción de microsistemas suelen ser las mismas que se usan para realizar elementos de orden macro, ver Figura 2.

En años recientes ha tomado fuerza la tendencia de reducción del volumen de las máquinas herramienta debido a que se reduce su consumo energético y aumenta su precisión y portabilidad [Kussul, 2006]. Esta reducción propicia también un menor consumo de materia prima e impacto ambiental [Kussul, 2002]. Esta generación de máquinas surge como respuesta a la demanda de micro sistemas y elementos mecánicos miniatura.

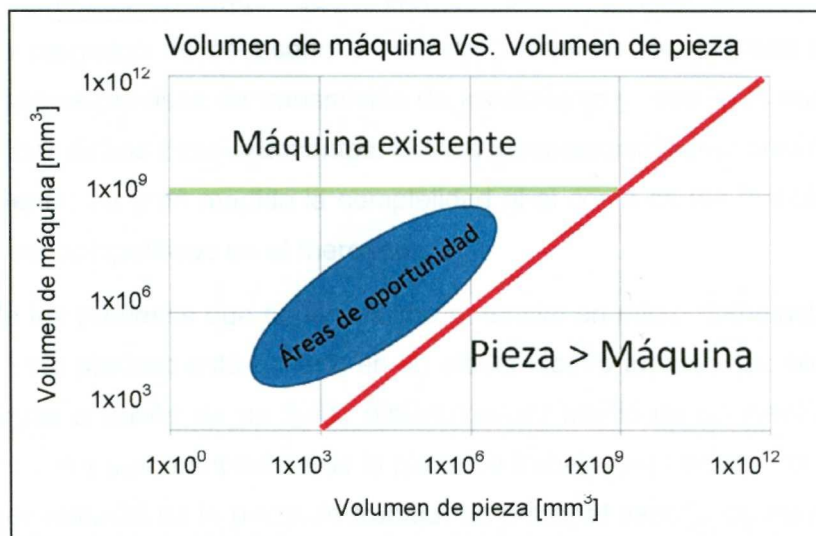


Figura 2. Relación entre el volumen de la maquinaria y las piezas fabricadas.

1.2 Motivación y justificación

La propagación de errores a través de las máquinas herramienta aumenta conforme lo hace su volumen. La precisión de una máquina es afectada por errores geométricos causados por imperfecciones mecánicas, pérdidas de transmisión de movimiento, desalineaciones, desgaste y expansión térmica de los elementos de la estructura de la máquina, así como también errores inducidos por cargas estáticas y dinámicas. Como resultado se tiene un error volumétrico relativo entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo.

Es necesario cuantificar los desplazamientos y errores de las máquinas. Los sensores de medición y retroalimentación no deben incrementar la

complejidad de los diseños mecánicos ya que la precisión, repetibilidad y resolución de las máquinas dependen de dicha retroalimentación.

Existen diferentes propuestas cuyo objetivo es eliminar los errores. Dichas opciones han reducido considerablemente el error, mas se limitan en otros requerimientos técnicos, como la longitud de la carrera, la fuerza o la velocidad de operación. Otro de los factores importantes que no se ha tomado en cuenta con estas soluciones es el costo.

De lo anterior se concluye que los procesos de manufactura modernos, requieren tolerancias cada vez más cerradas y la capacidad de posicionamiento en rangos sub-micrométricos. Para mantener resoluciones de esa magnitud es necesario contar con máquinas de volumen reducido, mecanismos precisos de transmisión de movimiento y sensores capaces de cuantificar dichos desplazamientos. Dichos mecanismos y sensores no deben incrementar en gran medida la complejidad ni el costo de las máquinas para poder ser competitivos en el mercado.

Uno de los procesos que tienen mucho potencial en micro manufactura es el EDM. Este proceso está basado en un efecto electro térmico que consiste en descargas a través de un fluido dieléctrico por medio de un electrodo para proveer calor a una superficie de la pieza de trabajo, esto ocurre con el fin de remover material de la pieza de trabajo. La principal ventaja de este proceso es que se pueden realizar cortes a materiales de alta tenacidad sin la actuación de fuerzas en el corte. En [Chaides, 2008] se desarrolló un proceso de electroerosión mediante un posicionador realizado por [García, 2010] la principal área de oportunidad está en la resolución de dicho posicionador, una resolución menor permitiría la fabricación de una mayor diversidad de piezas.

Lo anterior causa calentamiento del electrodo, la pieza de trabajo y el fluido dieléctrico mediante un canal que forma un canal de gas parcialmente ionizado.

Se tiene un posicionador anteriormente desarrollado con los parámetros adecuados para realizar el proceso de EDM, una máquina con mejor

resolución propiciaría a la fabricación de una mayor variedad de productos en la escala micro.

Se probó el diseño de un arreglo de foto detectores de haz de luz en un interferómetro Michelson compuesto por monturas y sistemas de alineación comerciales, motivo por el cual se espera diseñar y construir los elementos mecánicos para conformar un sensor de posición propio basado en interferometría de Michelson.

1.3 Temas de investigación

1.3.1 Precisión

Es posible definir la precisión de una máquina en términos de: dimensión, angularidad, forma, acabados superficiales, cualidades de la superficie (Integridad mecánica), y cinemática (Precisión de movimiento). La precisión del movimiento puede describirse según [Okafor, 2000]:

- Repetibilidad: Sugiere la habilidad para repetir el mismo movimiento o medida en un número dado de intentos.
- Resolución: Es el incremento más fino posible de movimiento o medición.
- Precisión: es la diferencia del promedio de las distancias obtenidas de un número de intentos con respecto a un punto objetivo.

Las máquinas deben diseñarse para cumplir con las metas de precisión y su desempeño debe poder medirse.

Dentro de los requisitos funcionales de una máquina de precisión se encuentran:

- Poseer una referencia cinemática perfecta
- Poseer un par cinemático perfecto, con movimiento perfecto respecto a referencia
- Prevenir ruido durante la operación
- Detectar el movimiento con precisión

1.3.2 Matrices homogéneas de transformación (HTM)

Los errores geométricos son causados por imperfecciones mecánicas de la estructura de la máquina herramienta y desalineaciones. Todos ellos cambian gradualmente debido al desgaste de los componentes. El efecto de las imprecisiones geométricas son errores de cuadratura y paralelismo entre los elementos móviles de la máquina herramienta. Estos mismos se demuestran en la posición y orientación de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo.

A continuación se muestra un esquemático de 6 componentes de error de un centro de maquinado vertical en el eje X ver Figura 3.

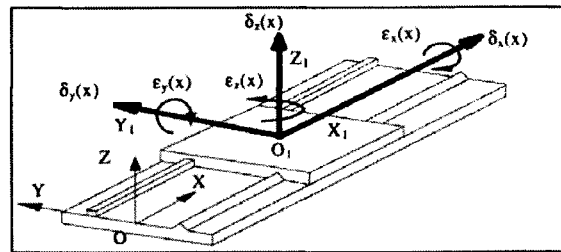


Figura 3. Esquemático de 6 componentes de error de movimiento de un carro de una máquina herramienta.

De donde es posible identificar:

- OXYZ Sistema de coordenadas de referencia
- $O_1X_1Y_1Z_1$ Sistema de coordenadas del carro
- X Dirección de movimiento deseada
- $\epsilon_x(x)$ Error de rotación en el eje X (giro)
- $\epsilon_y(y)$ Error de rotación en el eje y (inclinación)
- $\epsilon_z(z)$ Error de rotación en el eje z (derrape)
- $\delta_x(x)$ Error de traslación en el eje X (escala)
- $\delta_y(y)$ Error de traslación en el eje y (rectitud horizontal)
- $\delta_z(z)$ Error de traslación en el eje z (rectitud vertical)

Las 7 componentes geométricas del error de un eje de un centro de maquinado son:

Tabla 1. Componentes geométricas del error de un eje de un centro de maquinado.

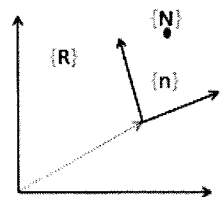
Tipo de errores	Número de componentes del error
Lineales	1
Rectitud	2
Angulares	3
Ortogonalidad	1
Total	7

Existen también errores generados por cambios de temperatura, fuentes locales de calor o motores, fricción en cojinetes, elementos de transmisión, u otros elementos de transmisión y generadores de calor en el proceso de corte. Estos causan expansión, contracción y deformación de la estructura de la máquina herramienta y generan errores posicionales entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo.

Otro tipo de errores son los causados por cargas inducidas, debido al peso de la pieza de trabajo, fuerzas resultantes del proceso de corte y fuerzas de gravedad resultantes del desplazamiento de los componentes de las máquinas. Todos estos causan deformaciones elásticas en la estructura de la máquina herramienta.

Las máquinas multi-eje están típicamente compuestas de una secuencia de elementos conectados por juntas que proveen movimiento de rotación o de traslación. Utilizando cinemática de cuerpo rígido, se puede modelar cada eje de la máquina con respecto a otro y se puede modelar un marco usando matrices homogéneas de transformación (HTM) [Stekin, 2000].

Una matriz homogénea de transformación en un espacio tridimensional es una matriz de 4x4. Puede ser usada para representar un sistema coordinado con respecto a otro o un sistema de coordenadas. Una HTM describe la traslación pura de un carro ideal para el eje "X" ver Ecuación 1.



El diagrama muestra un sistema de coordenadas con un eje horizontal y un eje vertical. Se definen dos sistemas de coordenadas: {R} (Referencial) y {N} (Núcleo). El eje vertical de {R} es etiquetado como {n}. El eje de {N} está rotado con respecto al eje de {R}.

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} = {}^R T_N \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las coordenadas de un punto {N} con respecto al sistema de referencias {R} están dadas por la matriz de transferencia del sistema de referencias {N} con respecto a {R} (${}^R T_N$) multiplicada por las coordenadas del punto {N} en el sistema de referencias {n}.

De donde:

$${}^R T_N = \begin{bmatrix} O_{ix} & O_{iy} & O_{iz} & d_x \\ O_{jx} & O_{jy} & O_{jz} & d_y \\ O_{kx} & O_{ky} & O_{kz} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & d_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

La Ecuación 2 representa las proyecciones de los ejes girados de un sistema de coordenadas dado sobre un sistema general de referencias.

De esta manera las coordenadas de cualquier punto en un sistema de coordenadas dado se pueden establecer con respecto un sistema de referencias general mediante la siguiente Ecuación 3:

$${}^R T_N = \prod_{m=1}^n {}^{m-1} T_m = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 \bullet \bullet \bullet {}^{n-1} T_n \quad (3)$$

1.4 Objetivos

El objetivo general es diseñar, construir y caracterizar dos sistemas mecánicos para micro y meso manufactura.

Un objetivo específico es diseñar y construir un posicionador lineal vertical de volumen reducido capaz de obtener mejor resolución que uno anteriormente desarrollado en [García, 2010], sin dejar de lado el bajo costo.

Los objetivos metodológicos para el posicionador se establecen:

1. Aplicar las herramientas de diseño: Descomposición funcional, matriz morfológica, desarrollo de conceptos, matriz de decisión
2. Predecir la posición virtual del posicionador mediante el cálculo de su matriz homogénea de transformación
3. Caracterizar el desempeño mediante equipos de metrología

Otro objetivo específico es diseñar y construir la estructura, soporte y sistema de alineación de un sensor de posición basado en interferometría Michelson de bajo costo.

El objetivo metodológico para este sensor se establece:

1. Aplicar las herramientas de diseño: Descomposición funcional, matriz morfológica, desarrollo de conceptos, matriz de decisión
1. Caracterizar un porta espejo flexible útil para la alineación

1.5 Alcances

1.5.1 Posicionador

Se espera mejorar desde la perspectiva mecánica del eje de posicionamiento vertical la resolución del posicionador presentado en la tesis de [García, 2010] usando en la misma tuerca flexible para posteriormente comparar con otro diseño.

Se espera predecir la propagación de errores mediante cálculos de HTM.

1.5.2 Sensor

Desde la perspectiva mecánica, se espera que sea posible mediante ajustes en los elementos mecánicos diseñados, soportar y alinear los componentes ópticos con el fin de detectar el espectro de interferencia de Michelson. Después de alinear el haz de luz, se espera probar mediante desplazamientos finos la detección de la dirección del desplazamiento, mediante el conteo de franjas del patrón de interferencia.

Capítulo II. Posicionador lineal vertical para máquina de micro EDM

2.1 Antecedentes del posicionador

[García, 2010] desarrolló un posicionador para micro electroerosión compuesto por un tornillo de 5/16" 18 UNC conectado por medio de un acoplamiento a un motor de pasos de resolución de 1.8° por paso, la posición del electrodo se controlaba mediante la rotación del motor de pasos ver Figura 4. Este sistema tenía una resolución mínima promedio de 9 μm , suficientes para llevar a cabo el proceso de EDM [Chaides, 2010].

Este posicionador usó una tuerca flexible para transmitir el movimiento de rotación del tornillo a traslación en el desplazador, garantizando la unión constante de la cuerda del tornillo y la cuerda de la tuerca flexible.

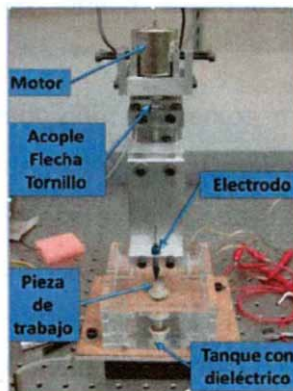


Figura 4. Posicionador construido por [García, 2010].

En el proceso de EDM el tiempo y la calidad de acabado son afectados directamente por la capacidad de control sobre el electrodo [Asab, 2007]. Este control además de una etapa electrónica de sincronización de movimiento se basa en la resolución, repetibilidad y precisión del elemento mecánico que se desea desplazar.

En el EDM el tamaño del espaciamiento que debe haber entre el electrodo y la pieza de trabajo, puede disminuir a pocos micrómetros, un espaciamiento pequeño es difícil de alcanzar y mantener estable [Chaides 2008], en esta

última referencia se presenta un sistema de posicionamiento y potencia, en el cual, se controla el espaciado entre el electrodo para lograr la correcta remoción de material de la pieza de trabajo en un proceso de μ EDM.

2.2 Revisión bibliográfica

Diversas propuestas acerca del desarrollo de mecanismos de producción de micro desplazamientos han sido realizadas. El objetivo de todos estos fue conseguir una repetibilidad en el rango de las micras en el menor tiempo posible con carreras cada vez mayores sin perder resolución o precisión. Todo con el menor consumo de energía posible.

[Samir, 2000] presentó el diseño de una máquina de precisión. Se alcanza una precisión de 16 nm, precisión geométrica global de 1 μ m con el uso de rodamientos hidrostáticos y una carrera de 220 mm con muy alta rigidez y una velocidad de operación de 10 mm/seg controlado por un sistema de lazo cerrado y un Internal Model Control (IMC) . La metrología consistió de un interferómetro y un "encoder" óptico. El equipo y los materiales elevan el costo de este sistema.

[Kim, 2003] diseñó un motor con elementos magnetostrictivos capaz de proporcionar una fuerza de 33 N y 10 micrómetros de resolución de movimiento, La velocidad de operación es de 0.045 mm/seg. Los elementos magnetostrictivos presentan ventajas por ejemplo; precisión de posición en el rango de los nanómetros, alta velocidad de operación, nulo mantenimiento, nula lubricación, alto control (si se les maneja con un control de lazo cerrado) y facilidad de uso con respecto a los motores lineales además la fuerza se puede escalar al agregar más elementos magnetostrictivos al arreglo ver Figura 5, la principal ventaja es que pueden adherir movimiento lineal sin la introducción de un mecanismo de giro. Como desventajas; tienen poca capacidad de carrera, tamaño voluminoso lo hace impráctico para la presente aplicación. Su principal aplicación es en los motores oruga.

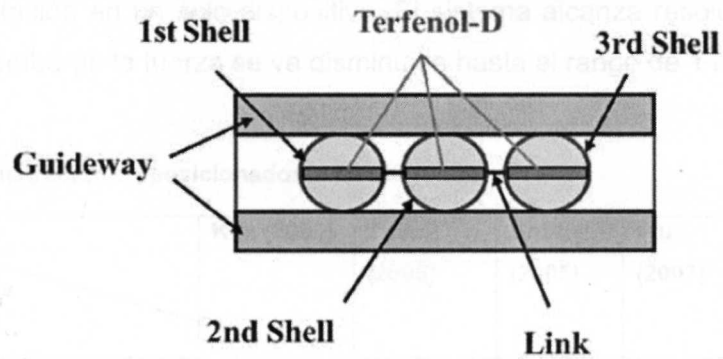


Figura 5. Esquemático del motor compuesto por elementos magnetostrictivos [Kim, 2003].






[Tien, 2005] hizo uso de actuadores basados en PZT y elementos flexibles para posicionar en 3 grados de libertad a una plataforma mediante una estructura paralela. El dispositivo puede ser implementado para movimientos de micrómetros o incluso nanómetros cuando se ocupa un control de lazo cerrado. La repetibilidad es reducida cuando se tiene un control de lazo abierto. La introducción de un sistema de retroalimentación en conjunto con el sistema basado en PZT aumenta el costo del posicionador. Las posibles aplicaciones incluyen ensambles de micro sistemas, células de manipulación biológica y de microcirugías.

[Shutov, 2005] empleó motores electromagnéticos miniatura lineales síncronos con el propósito de alcanzar micro posicionamiento en carreras largas ver Figura 6, en este diseño se hace énfasis en el uso de imanes como una opción libre de conexiones eléctricas y por lo tanto de complejidad, el movimiento del rotor fue construido por juntas tipo cola de milano debido a la restricción del movimiento y al baja desalineación que dichas guías representan. La capacidad se limita por la necesidad de la retroalimentación. Su principal uso es en posicionamientos ópticos, robótica, cirugías. La velocidad de operación reportada es de 8 cm/seg.

[Wu, 2007] utilizó una alternativa de retroalimentación para sistemas basados en actuadores inductivos mediante el uso de un LVDT que hace las veces de bobina excitadora del entrehierro. El sistema reduce la cantidad de componentes empleados al integrar una bobina excitadora y un sensor de

retroalimentación en un solo dispositivo. El sistema alcanza resoluciones de 20 μm sin embargo la fuerza se ve disminuida hasta el rango de 1 N.



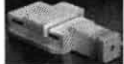

Tabla 2. Comparación de posicionadores de referencia

Autor Característica	Kim (2003)	Tien (2005)	Shutov (2005)	Wu (2007)	Tesis actual (2010)
PZT-Elemento flexible		X			
Motor magnetoestrictivo	X				
Motor electromagnético			X		
Actuador inductivo				X	
Tuerca flexible					X
Banda y poleas					X
Robustez	X	X			X
Grados de libertad	1	3	1	1	1
Resolución [μm]	10	5	5	20	2
Velocidad [cm/seg]	8		0.0045		30.45
Carrera [cm]	2.52e-4	1.5e-4	6	5	13
Fuerza [N]	33			1	3
Imagen					

2.3 Sistemas comerciales de posicionadores lineales

Los sistemas mecánicos tanto manuales como automatizados que se encuentran en el mercado incluyen una diversidad de elementos y características que los hace costosos por mencionar algunas de estas características: precisión con que fueron maquinados y ensamblados, los motores y controladores así como también a los mecanismos de transmisión de movimiento. El análisis del mercado muestra:

Tabla 3. Precios de sistemas comerciales de posicionadores lineales.

Guía	Marca	Características técnicas	Volumen [cm ³]	Precio USD	Imagen
XN10-0020-E25-71	Velmex	Carrera 2" Repetibilidad 2.5 µm	328.7	410	
Microslide series	Newmark	Carrera 2" Repetibilidad 0.02 µm (microstepping)	175	980	
NLS4 Series	Newmark	Max travel 2" Repetibilidad 0.3 µm	840	350	
Linear Slides:	Newmark	Max travel 100 mm Repetibilidad 0.5 µm	1718	3062	

Estos posicionadores muestran precisión de movimiento y además del alto costo que representarían, necesitan elementos de sujeción y fijación de acuerdo a cada sistema en particular.

2.4 Arquitectura del posicionador

Se identifican tres sistemas que componen al posicionador; eléctrico, electrónico y mecánico. El sistema eléctrico es el motor, el sistema electrónico representa el control del motor y el sistema mecánico todos los componentes de soporte y de transmisión movimiento, como se muestra en la Figura 6.

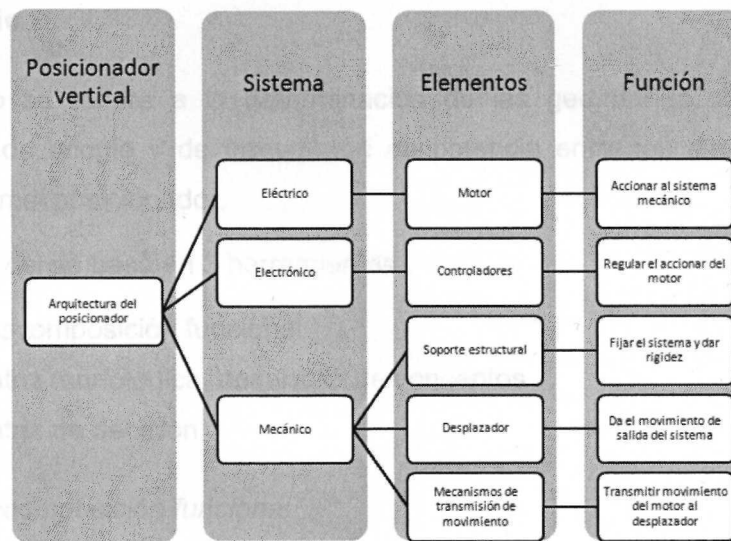


Figura 6. Arquitectura del posicionador.

2.5 Metodología de diseño

La metodología de diseño se basó en las siguientes etapas:

1. Definir la función de desempeño del posicionador
2. Investigar el funcionamiento y los parámetros adecuados
3. Diseñar y validar la estructura mecánica
4. Construir y ensamblar los componentes

Se hace énfasis en la etapa del diseño sabiendo que en el EDM el tiempo y la calidad de acabado son afectados directamente por la capacidad de control electrónico y mecánico de la posición del electrodo y que el sistema mecánico debe ser capaz de posicionar a pocos micrómetros al electrodo de la pieza de trabajo.

Se sabe que es posible llevar a cabo el proceso de EDM con un sistema mecánico de resolución de $9\ \mu\text{m}$, [Chaides, 2008] pero un sistema con mayor resolución permitiría realizar maquinados más ajustados en términos de dimensionamiento lineal.

2.6 Diseño

El diseño se refiere a la determinación de las geometrías, materiales y métodos de acople y de transmisión de potencia entre los elementos que conforman el posicionador.

El diseño del se basó en 3 herramientas:

1. Descomposición funcional
2. Matriz morfológica, desarrollo de conceptos
3. Matriz de decisión

2.6.1 Descomposición funcional

Para el caso del posicionador, se identifican como principales funciones activas: Desplazar linealmente mediante la eliminación del juego o huelgo entre las roscas del tornillo y la tuerca, realizar el movimiento lineal con resolución mínima, alta repetibilidad y precisión además de realizar una larga carrera. Las funciones pasivas del posicionador son dar soporte a otros elementos, reducir el consumo de energía y eliminar vibración, ver Figura 7.

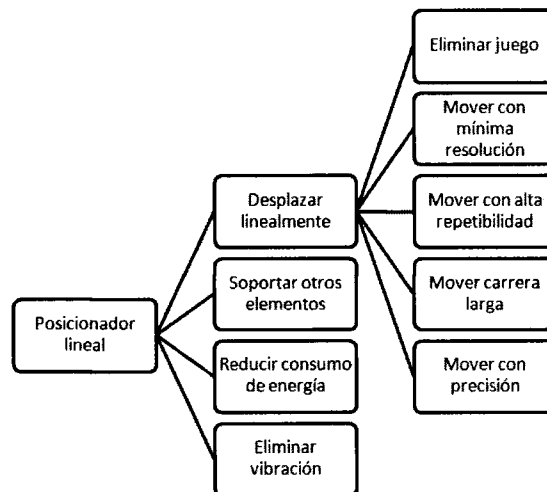


Figura 7. Descomposición funcional.

2.6.2 Matriz morfológica y desarrollo de conceptos

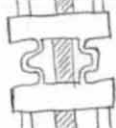
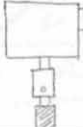


En base a la descomposición funcional del posicionador se presentan las siguientes opciones para realizarlas. Ver tabla 4.

Tabla 4. Matriz morfológica del posicionador vertical.

Funciones	Soluciones					
1. Eliminar el juego	1.A- Tornillo de bolas	1.B- Tuerca flexible	1.C- Tuercas comerciales anti-juego	1.D- Motores lineales	1.E- Actuadores PZT	1.F - Retroalimentación
2. Mover con alta resolución	2.A- Motor acoplado al tornillo UNC	2.B - Transmisión del motor a tornillo UNF por poleas	2.C - Transmisión del motor a tornillo por engranajes	2.D - Actuadores PZT	2.E- Motores lineales	2.F - Control electrónico
3. Mover con alta repetibilidad	3.A- Sistema de retroalimentación	3.B- Motores lineales	3.C- Guías de precisión	3.D - Actuadores PZT	3.E- Guías tipo cola de milano	
4. Mover con precisión	4.A- Sistema de retroalimentación	4.B- Motores lineales	4.D- Guías de precisión	4.D - Actuadores PZT	4.E- Guías tipo cola de milano	
5. Soportar a otros elementos	5.A- Base compacta rígida	5.B- Bases compactas y ensambladas	5.C - Elementos comerciales de soporte			
6. Reducir consumo de energía	6.A- Reducción de volumen	6.B - Reducción de fricción				
7. Eliminar vibración	7.A- 12 Bases y componentes rígidos de acero	7.B- 18 Bases unidas de aluminio y acero	7.C -Bases y soportes rígidos comerciales			

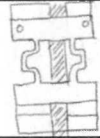
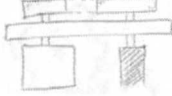


Se desarrollan conceptos uniendo las posibles soluciones para cada función de la matriz morfológica. Se proponen tres conceptos; el primero es el anteriormente fabricado por [García, 2010] ver Tabla 5, el segundo el correspondiente al posicionador reportado en esta Tesis ver Tabla 6 y el tercero de los elementos que restan de la matriz morfológica, ver Tabla 7.

Tabla 5. Concepto 1 del diseño del posicionador.

Función	Solución	Bosquejo
1. Eliminar el juego	1.B Tuerca flexible	
2. Mover con alta resolución	2.A Motor acoplado al tornillo UNC	
3. Mover con alta repetibilidad	3.E Ensamble de 18 componentes	
4. Mover con precisión	5.D Guías lineales	
5. Soportar a otros elementos	5.B Bases compactas y ensambladas	
7. Reducir consumo de energía	6.B Reducción de fricción que forcé al motor	
6. Eliminar vibración	7.B Bases unidas de aluminio y acero	


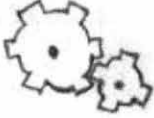
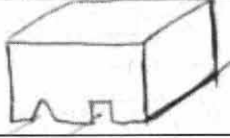
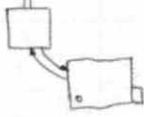
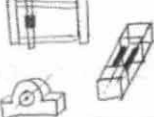
En este diseño se tiene una base estructural compuesta por bases de acero y aluminio ensambladas. El motor se acopla directamente al tornillo de potencia y la transmisión de rotación del motor a traslación al carro desplazador se hace mediante una tuerca flexible. Se usan guías lineales.

Tabla 6. Concepto 2 del diseño del posicionador.

Función	Solución	Bosquejo
1. Eliminar el juego	1.B Tuerca flexible	
2. Mover con alta resolución	2.B Transmisión del motor a tornillo UNF mediante poleas	
3. Mover con alta repetibilidad	3.E Ensamble de 12 componentes	
4. Mover con precisión	6.E Guías tipo Cola de Milano	
5. Soportar a otros elementos	5.A Base compacta rígida	
7. Reducir consumo de energía	6.A Reducción de volumen	
6. Eliminar vibración	7.A Bases y componentes rígidos de acero	

Este diseño estaría compuesto por una base estructural de acero, con el mínimo de elementos requeridos y la transmisión de potencia se haría por medio de un sistema de banda y poleas. Es tornillo a su vez transmitiría el movimiento a una tuerca flexible que desplazaría a un elemento porta tuerca montado a una guía tipo cola de milano.

Tabla 7. Concepto 3 del diseño del posicionador

Función	Solución	Bosquejo
1. Eliminar el juego	1.A Tornillo tipo ball screw o lead screw	
2. Mover con alta resolución	2.C Transmisión del motor a tornillo mediante engranajes	
3. Mover con alta repetibilidad	3.C Guías de precisión	
4. Mover con precisión	4.A Sistema de retroalimentación	
5. Soportar a otros elementos	5.C Elementos comerciales de soporte	
7. Reducir consumo de energía	6.A Reducción de volumen	
6. Eliminar vibración	7.C Bases y soportes rígidos comerciales	

La base estructural de este diseño sería un elemento comercial y la transmisión del movimiento de rotación se haría por medio de un sistema de engranajes a un tornillo de bolas. Se usarían guías de precisión comerciales y un sistema de retroalimentación ayudaría al sistema.

2.6.3 Matriz de decisión

Se califican las opciones de acuerdo a los parámetros de criterio mediante una matriz de decisión dentro de los tres conceptos propuestos. Se califica (-1) un concepto malo, (0) sin diferencia y (1) a una mejor opción. Se continúa con el concepto que obtiene una mejor calificación con respecto a las otras. Ver Tabla 8.

Tabla 8. Matriz de decisión acerca del diseño del posicionador.

Parámetro de criterio	Concepto 1 (Anterior)	Concepto 2 (Actual)	Concepto 3
Bajo costo	1	1	-1
Facilidad de manufactura	1	1	0
Precisión, resolución y repetibilidad	-1	1	0
Rigidez	-1	1	1
Consumo de energía	0	0	0
Facilidad para control electrónico	1	1	1
Facilidad de acople a elementos de	0	1	1
Portabilidad	1	1	1
Facilidad de ensamble con otros	1	1	1
Mantenimiento	1	1	-1
Trabajo continuo	0	1	0
Tecnología innovadora	1	1	-1
Total	5	11	2
Rango	2	1	3
Continuar	No	Si	No

Se encuentra que los componentes que deben conformar al posicionador para las funciones establecidas se presentan en los conceptos 1 y 2. Destacan como principales diferencias el bajo costo, la facilidad de manufactura y nulo mantenimiento de los sistemas mecánicos del concepto 1 y 2. Con respecto al 3. La principal diferencia entre estos los conceptos 1 y 2 son la precisión, la rigidez y la capacidad de acople con mecanismos de medición.

2.7 Construcción y validación de la estructura mecánica

2.7.1 Base

Los errores debidos a cargas estáticas o dinámicas se pueden evitar con un buen diseño estructural, las columnas representan la estructura fundamental de las máquinas, sus funciones son:

- Proveer un marco de referencia a los elementos cinemáticos
- Soportar cargas de compresión
- Aislar vibraciones
- Insensibilidad a cambios en el ambiente

Debido a su gran resistencia, facilidad de obtención y precio, la base del posicionador es de acero estructural ASTM A36 con un par de apoyos de aluminio. La base se compone de 4 elementos principales como se muestra en la Figura 9:

1. Base general
2. Base superior con cojinete
3. Base inferior con cojinete
4. Soportes laterales (Aluminio)

Las bases se unen con tornillos de 1/4" 18 UNC. La base superior tiene dos funciones principales; sirve de apoyo al tornillo mediante el rodamiento de media pulgada de diámetro exterior y soportar al motor (Nema 17 de 1.8° de resolución). La base inferior únicamente sirve para dar soporte al rodamiento que sostiene al tornillo. Los soportes laterales son los únicos componentes de aluminio de la base y sirven para dar rigidez a la base superior.

En las bases general y superior de acero del posicionador se tiene una interacción con los soportes triangulares de aluminio, esta interacción induce esfuerzos internos debidos a la expansión térmica en cada material y componente. Para verificar cual sería el error por dicha interacción, se realiza un análisis en COMSOL® que muestra los esfuerzos y deformaciones debidos a un cambio inducido de temperatura de 25° a 25.1°C; medición entre la cual oscila la temperatura en el laboratorio, y a las fuerzas ocasionadas por la masa del propio sistema. El sistema esta fijo en la cara inferior. Se obtiene una deformación máxima de 0.427 μm en dirección "-Z" del eje de referencias mostrado en la Figura 8, además un esfuerzo máximo de 0.8147 MPa. Los desplazamientos de mayor interés son los puntos 1 y 2 donde se colocan los cojinetes que soportan al tornillo. Ver Figura 8.

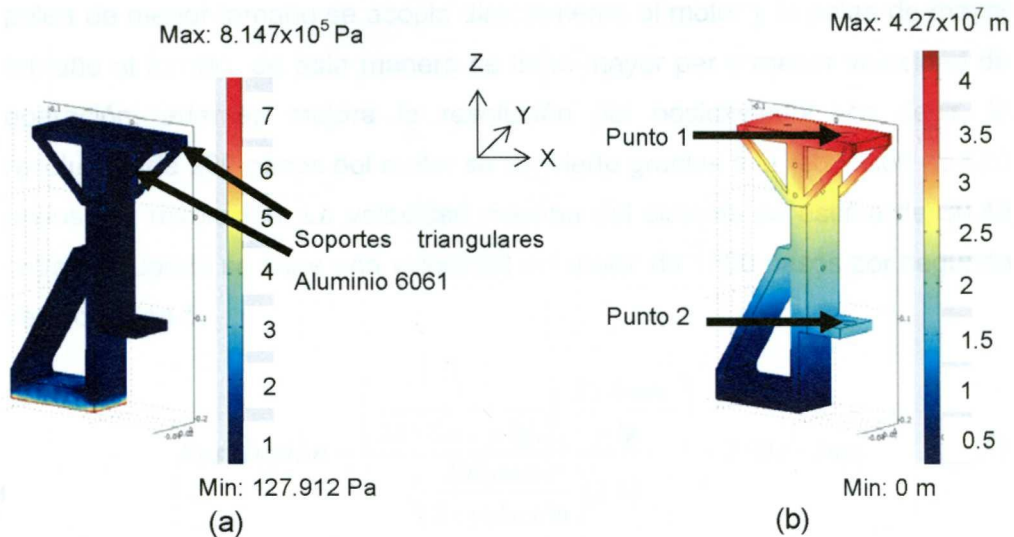


Figura 8. (a) Análisis de desplazamientos (b) Análisis de esfuerzos.

Analizando los resultados se observa:

Tabla 9. Deformaciones causadas por expansión térmica no uniforme de los componentes del posicionador.

Punto	Desplazamiento [mm]		
	X	Y	Z
1	-2 e-4	9 e-7	-2.84 e-4
2	-1.4 e-4	4.47 e-7	-1.91 e-5

El máximo desplazamiento es de $-0.284 \mu\text{m}$ en la dirección Z del punto 1. Esto representaría una expansión en la superficie del barreno que sostiene al cojinete superior. Al ser una carga axial sobre el tornillo, no representa mayor error en el desempeño del posicionador, además el tornillo tiene cierta capacidad de deflexión y las pruebas se realizan en laboratorios con temperatura controlada.

En la Figura 8 (b) se observa un esfuerzo sobre la cara inferior de la base general ocasionado por el peso del sistema.

2.7.2 Poleas y banda

La transmisión del movimiento se hace mediante dos poleas y una banda. La relación de las poleas es de 1:2.6 de acuerdo al diámetro de las poleas. La

polea de menor tamaño se acopla directamente al motor y la polea de mayor tamaño al tornillo, de esta manera se tiene mayor par y menor velocidad de operación, además mejora la resolución del posicionador, es decir, la resolución de 200 pasos del motor se convierte gracias a la reducción de 520 pasos por revolución. La velocidad máxima del sistema se estima de 30.45 cm/seg, cuando se tiene una velocidad del motor de 1500 pasos por segundo ver Ecuación 5.

$$Resolución = \frac{\left(\frac{1}{24hilos / p\lg.}\right)\left(\frac{25.4mm}{p\lg.}\right)}{\left(\frac{200pasos}{Revolución}\right)(2.6)} = 2.03e-3mm. \quad (4)$$

$$Velocidad = \left(\frac{1500pasos}{segundo}\right)\left(\frac{2.03e-2cm}{1paso}\right) = 30.45 \frac{cm}{seg} \quad (5)$$

Se tiene una resolución teórica al sistema lineal de 2.032 μm ver Ecuación 4, con lo cual se tiene una capacidad más fina de movimientos entre cada paso del motor que los 9 μm del posicionador anterior.

2.7.3 Tornillo de potencia

Se hace uso de un tornillo comercial de cuerda 5/16" 24 UNF sobre el cual se desplaza una tuerca flexible que transmite el movimiento de rotación a traslación. El paso de la cuerda del tornillo es de 1.058 mm.

2.7.4 Guías tipo Cola de Milano (Dovetail)

Las guías o correderas definen el movimiento de salida de los sistemas, la alineación y la cuadratura son de suma relevancia para la precisión. Las guías deben soportar la indentación y se deben de ensamblar de manera tal que las deflexiones se minimicen.

Se optó por una guía Cola de Milano de 60° de acero ya que da rigidez al sistema porque no permite el giro de los elementos que soporta durante el deslizamiento, como se muestra en la Figura 9. La guía se compone del elemento "hembra" de la guía que también sirve como porta tuerca, el

elemento “macho” y una cuña de bronce que evita el desgaste durante el deslizamiento del porta tuerca en la guía. El porta tuerca tiene barrenos con rosca de 5/40” UNC que sirven para ajustar el apriete de la cuña y ensamblar la tuerca flexible, ver Figura 9.

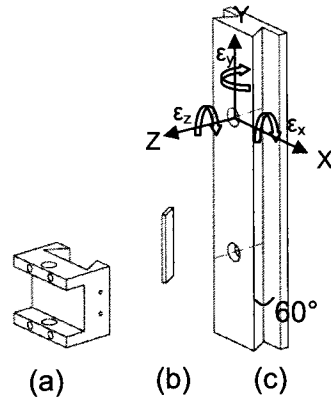


Figura 9. (a) Porta tuerca (b) Cuña de bronce (c) Guía tipo Cola de Milano.

2.7.5 Tuerca flexible

La tuerca flexible, es un elemento mecánico de metal en la que se distinguen dos secciones estructurales funcionales: una sección de soporte [2] y una sección de flexión [1] ver Figura 10.

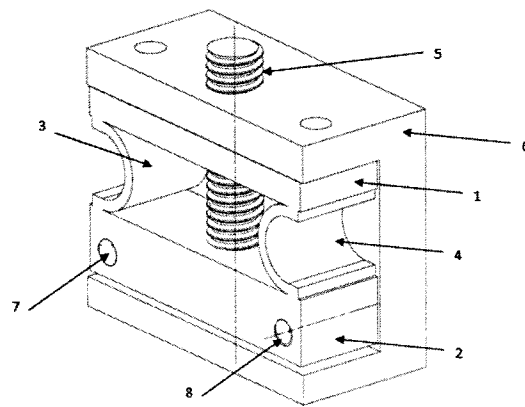


Figura 10. Tuerca flexible anti-juego sobre un porta tuerca.

Se tiene un orificio central roscado por donde pasa un tornillo de potencia [5] y un par de orificios pasantes [7 y 8] para facilitar la sujeción de la tuerca flexible con el porta tuerca. Para el correcto funcionamiento de la tuerca flexible solo debe sujetarse el elemento [2] al porta tuerca. Una vez que el

segundo elemento queda fijo al carro, el primer elemento queda libre de moverse respecto al que está sujeto al carro.

Las vigas de flexión [3 y 4] presentan la misma geometría en espejo. En operación normal, las vigas de flexión se comprimen o expanden en la misma dirección que el eje del tornillo de potencia.

Durante la inserción de la tuerca flexible en el tornillo de potencia en caso de que haya huelgo o juego, este se elimina, ya que las vigas flexibles permiten la expansión o compresión, es decir, permite la separación controlada entre la sección de soporte y la sección de flexión. Permitiendo así realizar movimientos lineales de alta precisión. La geometría de las vigas de flexión se define considerando el movimiento que se requiera entre la sección de soporte y la sección de fricción. En este trabajo se presentan dos diseños de aluminio, una tuerca fabricada en [García, 2010] con vigas de unión en forma de “U”, Figura 11 (a) y un diseño con vigas de unión en forma “semicircular” con un inserto de bronce pre lubricado ver Figura 11 (b).

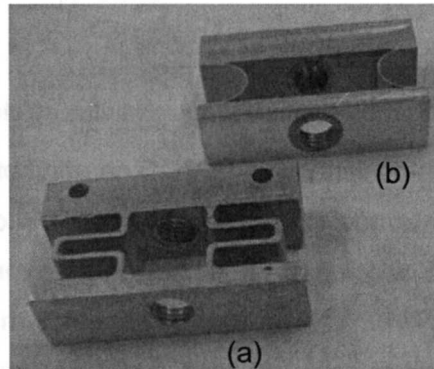


Figura 11. (a) Tuerca con vigas de unión en “U” (b) Tuerca de aluminio con inserto de bronce de vigas de unión “Semicirculares”.

2.7.6 Tuerca flexible de aluminio con vigas en "U" [T1]

Se llevó a cabo un análisis de elemento finito de la tuerca flexible para verificar cual es el desplazamiento máximo aplicando una presión sobre la cara superior normal que propicie un esfuerzo cercano al módulo de cedencia del Aluminio (414 MPa) ver Figura 12.

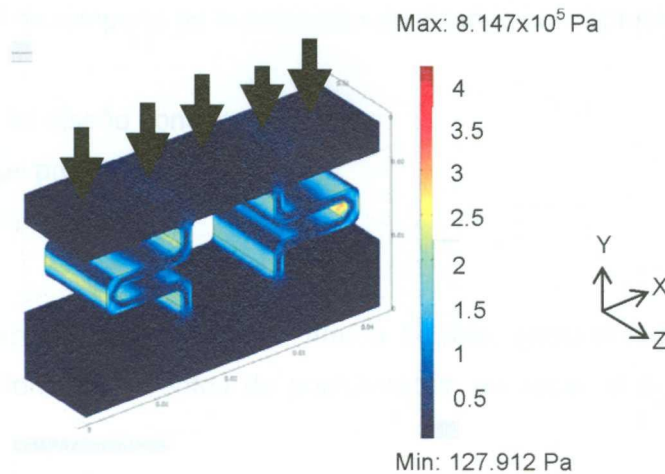


Figura 12. Análisis de esfuerzos de la tuerca flexible de aluminio en COMSOL®.

El análisis de elemento finito en COMSOL® consistió de un mallado de 22253 elementos cuadráticos y se aplicó una presión de 845.944 KPa en la dirección "-Y" en la cara superior de la tuerca flexible. El análisis de esfuerzos muestra un esfuerzo máximo von Mises de 417.3 MPa y un desplazamiento máximo de 0.3279 mm, es decir, para deformarla se requiere gran fuerza, esto implica que una vez precargada va a mantenerse comprimida. La tuerca flexible tendrá una deformación de hasta 0.3279 mm antes de deformarse plásticamente.

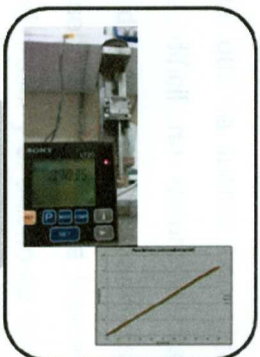
2.7.7 Tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce de vigas semicirculares [T2]

Basados en [Flores, 2006] donde se presenta una metodología para caracterizar un elemento flexible consistente en 5 etapas, se diseño una nueva tuerca flexible:

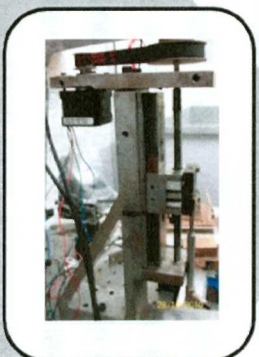
1. Generación de diseños conceptuales
2. Evaluación del desempeño de la selección de diseños conceptuales (FEA)
3. Refinamiento del diseño conceptual
4. Manufactura del prototipo
5. Caracterización del prototipo

Se procedió a realizar el diseño de otra tuerca flexible, geoméricamente compatible con los demás elementos de posicionador, en especial el porta tuerca ver Figura 13.

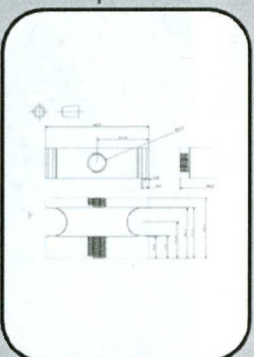
Caracterización
del equipo



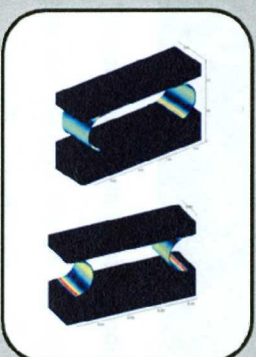
Manufactura
del prototipo



Refinamiento
del diseño
conceptual



Evaluación de
los diseños
conceptuales



Generación de
diseño
conceptuales

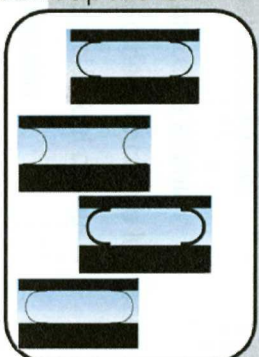


Figura 13. Metodología para caracterizar un elemento flexible presentada en [Flores, 2006]

Durante la etapa de diseños conceptuales, se estudiaron la geometría y formas de las vigas, ya que la tuerca con vigas de unión en "U" se consideraba sumamente difícil de deformar. Estos conceptos tendrían limitaciones geométricas debido al poco espacio disponible para esta tuerca. El objetivo del nuevo diseño fue tener una tuerca flexible más sensible al movimiento, reduciendo el grosor y el diseño de las vigas de flexión. El plano 1 del Apéndice A muestra las dimensiones.

La etapa de evaluación de diseños estudió principalmente el dimensionamiento de las vigas de flexión. En el refinamiento se diseñó un inserto de bronce pre lubricado con la finalidad de reducir la fricción entre el tornillo de potencia y la tuerca flexible durante el deslizamiento de las roscas. Se diseñó una interferencia H7/u6 entre el casquillo y el barreno de aluminio, como se muestra en la Figura 14.

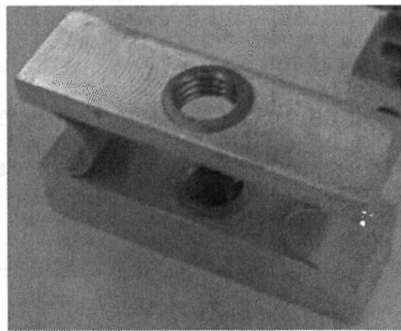


Figura 14. Tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce.

La geometría de las vigas de flexión de la tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce se realizó mediante electroerosión por hilo. El procedimiento para su manufactura fue:

1. Escuadrado de la pieza de aluminio
2. Torneado del inserto de bronce pre lubricado
3. Barrenado para inserción del casquillo
4. Introducción del casquillo
5. Barrenado y machuelado del inserto introducido en el aluminio
6. Electro erosionado por hilo (WEDM)

Se realizó un análisis de elemento finito a la tuerca flexible con inserto de bronce. La malla consistió de 20157 elementos cuadráticos de la geometría de la tuerca y se aplicó una presión normal de compresión de 84.923 KPa sobre la cara superior de la tuerca resultando en un esfuerzo máximo de 412.4 MPa y en un desplazamiento máximo de 0.4714 mm en la misma dirección que la de la fuerza aplicada.

Esto indica que dependiendo del acople de las cuerdas del tornillo y tuerca, esta última tendrá un rango máximo de movimiento de 0.4717 mm cuando se aplique una fuerza de 41.88 N que puede ser debida a la fricción o a la masa que se tiene en el porta tuerca móvil antes de deformarse plásticamente.

2.7.8 Prensa

La prensa consta de 2 piezas; una base inferior que soporta a la pieza que funge como pared de la prensa. Ambas piezas están hechas de acero y pueden sumergirse completamente en el fluido contenido por un tanque de acrílico. La pieza pared tiene barrenos machuelados de 1/4" 18 UNC para el acople de ambas piezas y la sujeción de la pieza de trabajo. La finalidad de la prensa es sostener a la pieza durante el proceso de electroerosión. Para acoplar al sistema el desplazamiento del tanque y la prensa en dirección "X" y "Y" los posicionadores soportarían a dicha prensa y contenedor.

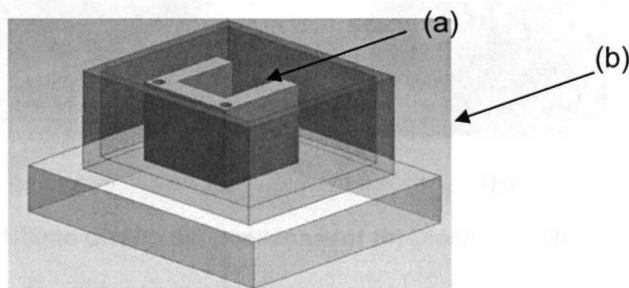


Figura 15. Prensa y tanque del posicionador.

2.7.9 Diseño final del posicionador

El diseño final del posicionador presenta contrastes con el posicionador anterior, las principales diferencias son:

- Bases soporte; el nuevo tiene una base con menos elementos
- Transmisión; la transmisión ahora se hace por medio de poleas
- Guías; las guías son ahora del tipo cola de milano

Este nuevo diseño propicia la rigidez del sistema y el acople de otros elementos y accesorios útiles para pruebas y montajes. El diseño final y el contraste con el posicionador construido anteriormente se presentan en la Figura 16.

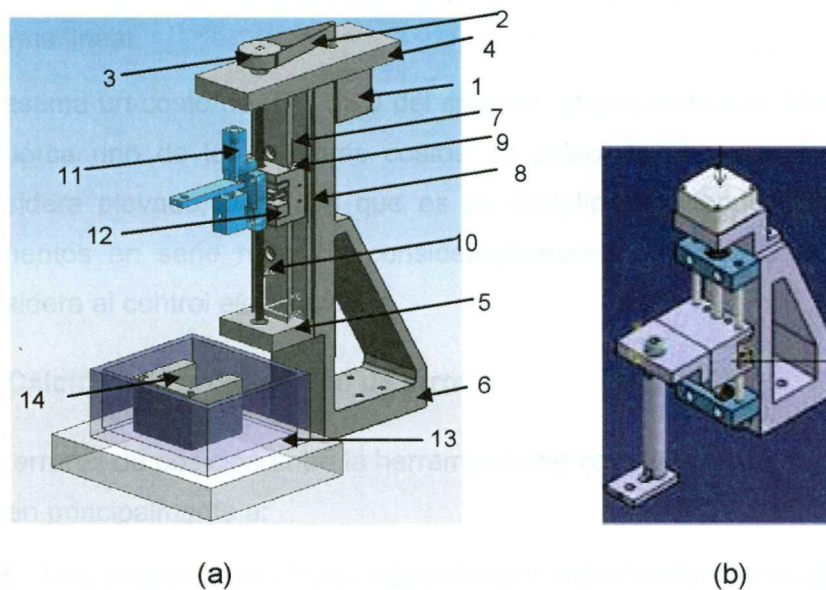


Figura 16. (a) Último diseño del posicionador (b) Diseño de [García, 2010].

Los elementos que conforman al posicionador son:

1. Motor de pasos Nema 17 (1.8° de resolución, velocidad máxima 2000 pasos por segundo)
2. Banda dentada
3. Poleas dentadas (1.7 y 4.5 cm)
4. Base superior
5. Base inferior
6. Base general

-
7. Guía "Dovetail"
 8. Porta tuerca
 9. Cuña
 10. Tornillo de potencia
 11. Tuerca roscada monolítica flexible anti-juego
 12. Sistema de posicionamiento fino de la máquina de μ EDM
 13. Tanque
 14. Prensa

Las principales diferencias con el posicionador anterior son la transmisión de movimiento de rotación a traslación mediante el sistema de poleas, paso del tornillo, las guías y la forma de la base estructural. Las guías disminuyen el giro que pudiera haber en el posicionador, La base disminuye la transmisión de vibraciones. Las poleas, banda y tornillo disminuyen la resolución del sistema lineal.

Se estima un costo de 270 USD del sistema, atribuyendo a la fabricación de la tuerca uno de los mayores costos. El costo de algunos elementos se considera elevado, debido a que es un prototipo. La fabricación de estos elementos en serie reduciría considerablemente el costo. Este precio no considera al control electrónico.

2.8 Cálculos de propagación de error

Los errores de posición entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo. Se deben principalmente a:

- Los errores geométricos causados por imperfecciones mecánicas de la estructura de la máquina herramienta
- Desalineaciones
- Fatiga y desgaste de los componentes
- Errores generados por cambios de temperatura generados por fuentes locales de calor o motores, fricción en cojinetes, elementos de transmisión, u otros elementos de transmisión y generadores de calor en el proceso de corte

- Errores por cargas inducidas; peso de la pieza de trabajo, fuerzas resultantes de el proceso de corte y fuerzas de gravedad resultantes del desplazamiento de los componentes de las máquinas
- Errores por pérdidas como juego o huelgo

Es posible identificar las posibles fuentes de error en el posicionador, ver Figura 17. Se muestra el error potencial del sistema de transmisión de movimiento rotatorio del motor al tornillo por medio de las poleas y banda en naranja. Posteriormente se observan en azul los errores de geometría de las bases (general, superior e inferior), así como también errores de la guía tipo cola de milano y el porta tuerca.

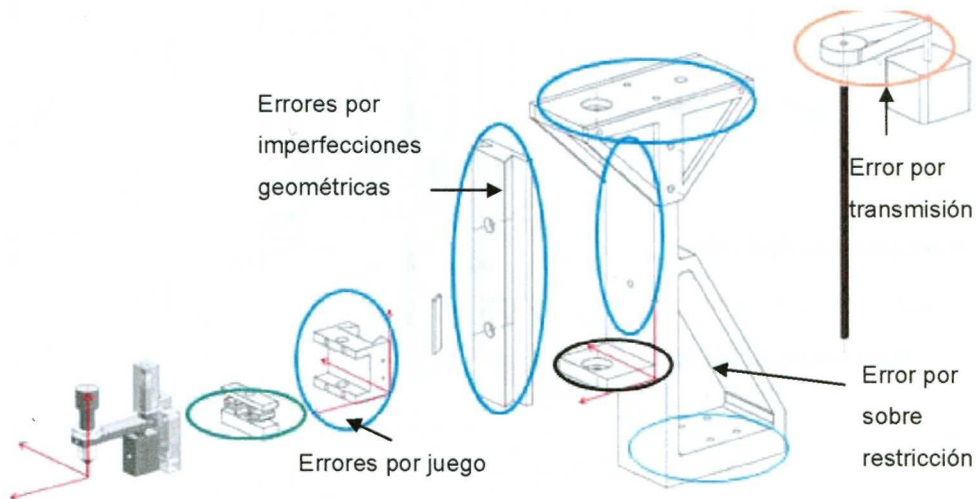


Figura 17. Errores potenciales del posicionador.

Se observa en el círculo negro un error debido a la sobre restricción de movimiento en un extremo del tornillo acoplado a la guía. Este último error aunado a un error de desalineación entre los cojinetes, agregan al sistema un error debido a la deflexión del tornillo. El círculo en verde muestra la posible fuente de error debido al juego o huelgo atribuible a la tuerca flexible.

El error por inercia en este caso es despreciable debido a la baja aceleración y masa del sistema.

2.8.1 Definición de los sistemas de coordenadas del posicionador vertical

Es posible ubicar sistemas coordenados en el posicionador, en este caso se ubican el sistema de coordenadas $\{R\}$ en la parte inferior derecha de la base, se ubica también al sistema de coordenadas $\{1\}$ con respecto al sistema de coordenadas $\{R\}$ en la base inferior derecha del porta tuerca y al punto de referencia $\{P\}$ en el sistema de referencias $\{1\}$ en el sistema de posicionamiento fino, como se muestra en la Figura 18.

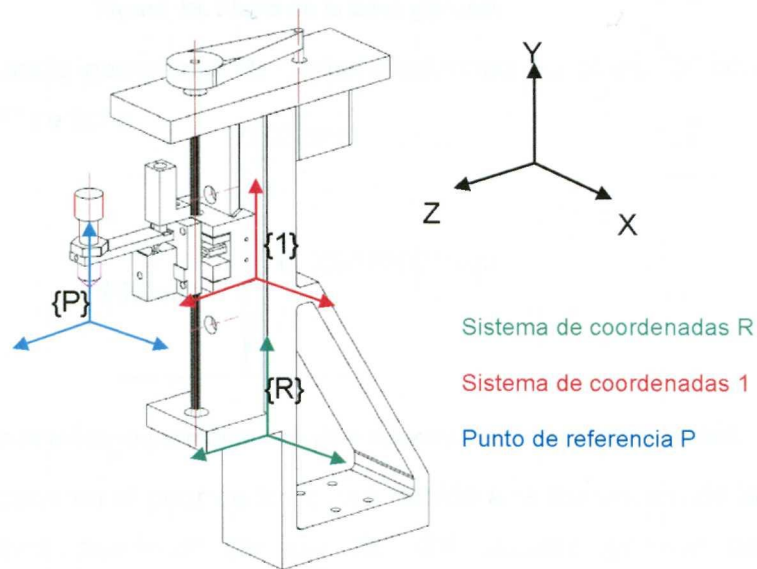


Figura 18. Sistemas coordenados del posicionador.

2.8.3 Cálculo de errores por desviaciones mecánicas de la estructura

En el plano 1 del Apéndice A de la base general del posicionador vertical se muestran dos tolerancias geométricas; una de planicidad y otra de perpendicularidad; la primer tolerancia es de $50 \mu\text{m}$, a este plano se asigna el nombre "A". La segunda tolerancia de perpendicularidad de $50 \mu\text{m}$ con respecto al plano "A" tiene una asignación "B".

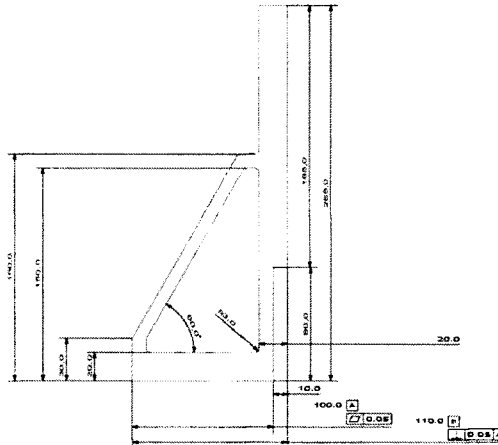


Figura 19. Plano de la base general.

Analizando la tolerancia geométrica de perpendicularidad del plano “B” con respecto al plano “A” se tiene:

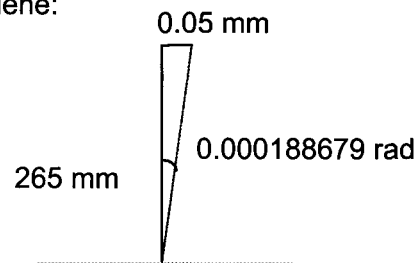


Figura 20. Error máximo permitido debido a tolerancia de perpendicularidad.

Este error se generaría en el peor de los casos debido a la asignación de la tolerancia geométrica alrededor del eje “X” del sistema general de coordenadas. Es posible cuantificar este error, al igual que el error calculado por momento de inercia en una HTM.

2.8.4 Cálculo de la matriz homogénea de rotación (HTM)

Es posible utilizar las coordenadas del punto {P} en el sistema de referencias {1}. Ver Figura 21 y del sistema {1} con respecto al sistema de coordenadas {R} ver Figura 22 para realizar un cálculo que predice el error.

También es posible sumar los errores geométricos y por cargas estáticas y dinámicas para realizar el cálculo de un error volumétrico mediante una HTM. En primer lugar se ubica el punto P en el sistema de coordenadas 1. Ver Figura 21.

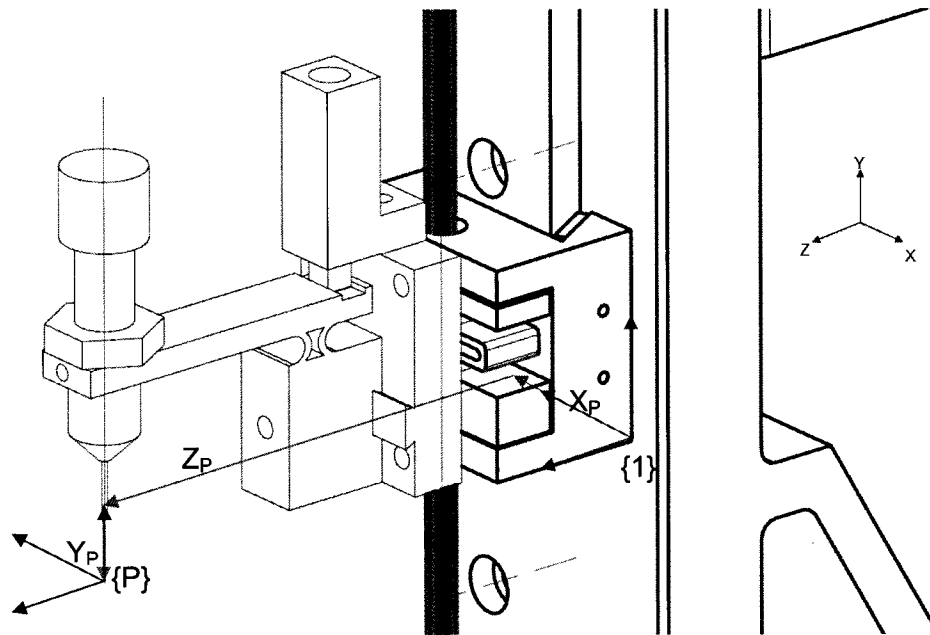


Figura 21. Coordenadas del punto P con respecto al sistema de coordenadas 1.

Las coordenadas del punto {P} en mm, con respecto al sistema de referencias {1} son:

$$X_P = -21.5$$

$$Y_P = -35$$

$$Z_P = 99.3417$$

Como segundo paso se obtienen las coordenadas del sistema {1} con respecto a las del sistema de referencia {R}. Ver Figura 22.

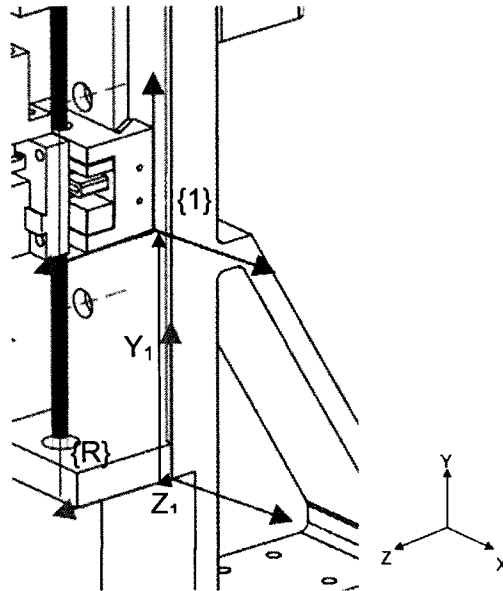


Figura 22. Coordenadas sistema de {1} con respecto al sistema de coordenadas {R}.

Las coordenadas son:

$$X_1=0$$

$$Y_1=100 \text{ (aproximadamente a la mitad de la carrera del posicionador)}$$

$$Z_1=5$$

El tercer paso es la suma de los errores por tolerancias asignadas y por cargas dinámicas. Es decir la suma de 0.000188679 rad debido a errores de geometría y 0.00001 rad debido a la inercia del sistema móvil que resulta en $1.9867e-4$ rad alrededor del eje "X". $\epsilon_{x_1} = 1.9867e-4$ rad.

Se realiza una matriz de rotación del sistema {1} con respecto al sistema {R} mediante las proyecciones del error calculado en cada eje coordenado.

$${}^R R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.9867E-4 \\ 0 & 1.9867E-4 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} Y \\ X \\ Z \end{matrix} \quad (8)$$

A continuación se realiza una matriz de transferencia del sistema {1} con respecto al sistema {R} mediante las proyecciones del error calculado en cada eje coordenado y las coordenadas.

$${}^R T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.9867E-4 & 100 \\ 0 & 1.9867E-4 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Se hace el cálculo de la posición del punto {P} con respecto al sistema de referencia {R}.

$${}^R T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.9867E-4 & 100 \\ 0 & 1.9867E-4 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -21.5 \\ -35 \\ 99.34170 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -21.5 \\ 64.98026 \\ 104.33475 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

De esta manera, es posible obtener el error entre la posición deseada y la real del punto {P} con respecto al sistema de referencias {R}. Ver Tabla 10.

Tabla 10. Posición deseada y error del punto {P}.

	Posición deseada	Error en la
X	-21.5	0
Y	65	-0.01974
Z	104.3417	-0.00695

Los resultados muestran un error de 0.01974 mm en la dirección “-Y” y -0.00695 en dirección “-Z”. La magnitud de estos errores es muy grande sobre todo en una micro máquina. La aplicación y magnitud de las tolerancias geométricas dependerá de las características de las máquinas y su entorno, así como también de la manufacturabilidad y costo del mismo. En este caso, aunque es un error potencial máximo permitido de 50 μm en la cara inferior de la base, afectaría de manera considerable a la precisión final del posicionador. La aplicación de una tolerancia mínima reduciría este error potencial.

2.9 Caracterización experimental

La finalidad de esta caracterización es validar el objetivo de minimizar la resolución del posicionador con respecto al anteriormente desarrollado. La variable de entrada es el número y dirección de pasos del motor por unidad de tiempo mediante un control presentado en [Chaides, 2008]. El montaje constó de una mesa neumática anti vibraciones sobre la cual se atornilla al posicionador y dos elementos de medición; un sensor LVDT de 0.5 μm de resolución y carrera de 1 cm; el segundo instrumento de medición es un “encoder” de 2000 pasos por revolución, es decir, 0.18° de resolución.

Esta caracterización se aplica a las dos tuercas flexibles ensambladas al posicionador.

El diagrama de bloques muestra la salida pulsos de la tarjeta de adquisición de datos por orden de la computadora para accionar el motor. El motor acoplado a una polea de diámetro 1.7 cm transmite el movimiento de rotación mediante la banda que mueve a una polea de 4.5 cm acoplada al tornillo y al “encoder”. Este tornillo gira y transmite mediante la tuerca flexible el movimiento de rotación a lineal al porta tuerca, este último movimiento es medido por el sensor LVDT. Las salidas del “encoder” y LVDT son procesadas por equipos de adquisición y un programa de Labview (ver Apéndice D) de datos para obtener resultados que contabilizan los pasos del motor, pasos del “encoder” y medición del sensor LVDT (ver Figura 23).



Figura 23. Diagrama de bloques del montaje experimental.

2.10 Pruebas al posicionador lineal

Es posible identificar 4 pruebas principales al posicionador (ver Figura 24):

1. Prueba de medición de transmisión del movimiento de motor a banda y poleas a través del “encoder” [P1]
2. Prueba de medición de repetitividad, resolución e histéresis con el sensor LVDT y el motor [P2]
3. Prueba de medición de linealidad en el desplazamiento, mediante el montaje del LVDT a un costado del porta tuerca [P3]
4. Prueba de fatiga; medición de la masa de la tuerca flexible después de transmitir el movimiento de rotación a traslación equivalente a un millón de ciclos del tornillo de potencia, esta prueba precede a las pruebas anteriores, es decir, se prueba el desempeño del posicionador después de la prueba de fatiga [P4]

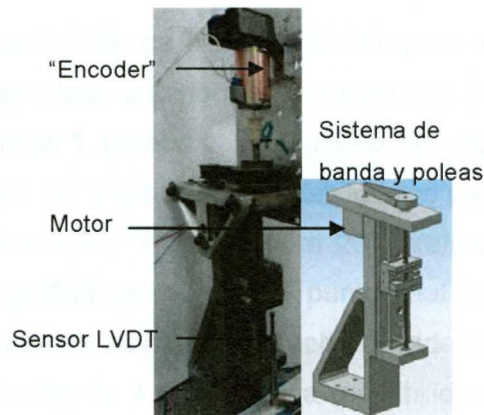


Figura 24. Elementos de medición para pruebas.

Se llevan a cabo 3 ciclos de pruebas de 100 pasos de ida y 100 pasos de vuelta sin perder contacto del sensor LVDT con el porta tuerca. En las pruebas se utilizaron los dos diseños, la tuerca flexible de aluminio en forma de “U” y la de aluminio con inserto de bronce de vigas en forma semicircular.

Se corrieron pruebas con las tuercas flexibles con y sin bloqueo. El bloqueo de la tuerca se define como la compresión de la misma para introducirse de este modo al tornillo de potencia (ver Figura 25). Anteriormente se tenía la hipótesis que la tuerca flexible se debía bloquear para reducir el juego entre

el tornillo y la tuerca. Se denomina a la prueba sin bloqueo como [S] y con bloqueo [C].

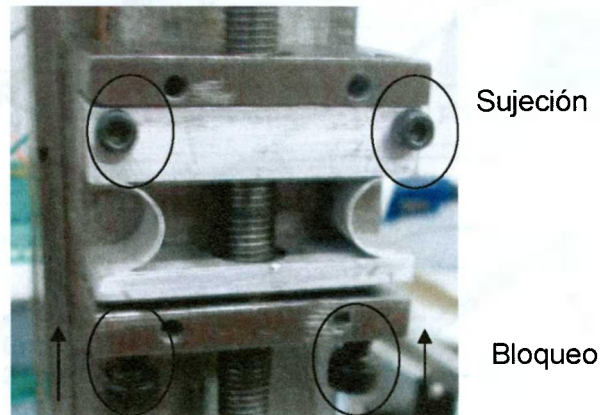


Figura 25. Bloqueo de tuerca flexible.

2.10.1 Resultados de la tuerca flexible de aluminio

Prueba sin bloqueo

Se probó la tuerca flexible de aluminio sin bloqueo utilizada también con el posicionador desarrollado anteriormente. La prueba [T1, P1, S] indica que la prueba fue a la tuerca 1, prueba 1, sin bloqueo. Se obtuvo una gráfica con los pasos del motor en "X" y los pasos contabilizados por el "encoder" acoplado al tornillo de potencia en "Y" (ver Figura 26), gráfica 1- Apéndice C. En el punto final de la gráfica se muestra el punto final 388 pasos del "encoder" exactamente en los tres ciclos de la prueba. Se identifica un juego promedio de 2 pasos, resolución de 4 pasos y una repetibilidad promedio de un paso. Al comienzo de la curva se muestra el máximo error de reversa, contabilizado en 3 pasos.

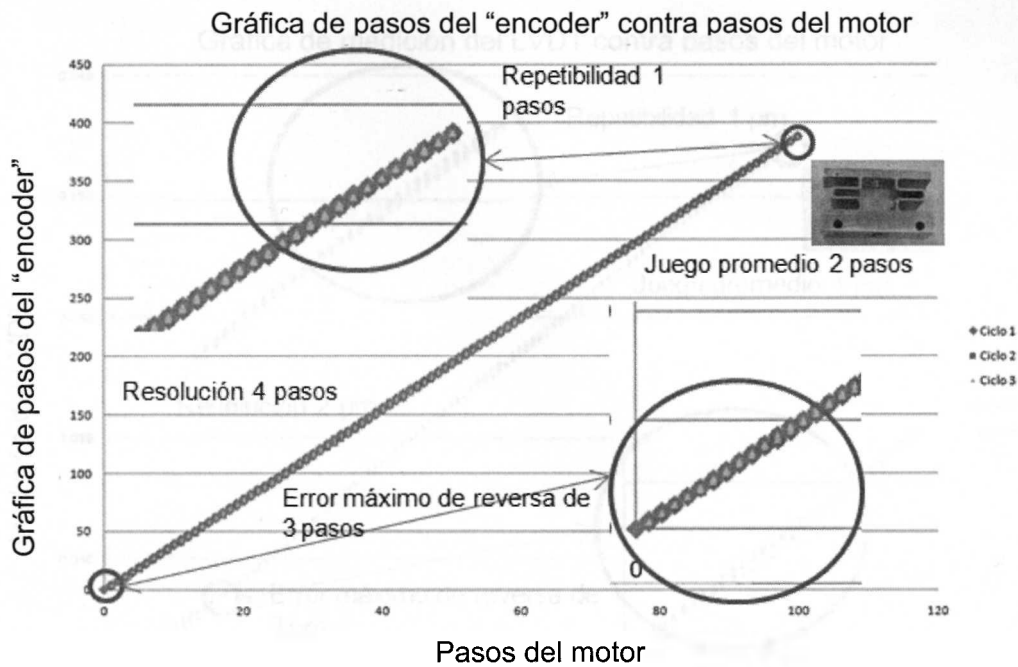


Figura 26. Gráfica pasos del "encoder" contra pasos de motor [T1, P1, S].

Se identifica la pérdida de 3 pasos contabilizados por el "encoder" debido al juego en las banda y poleas, lo cual corresponde a una pérdida en el desplazamiento lineal de $1.58 \mu\text{m}$ como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Resolución del motor, "encoder" y porta tuerca.

Resolución del motor por revolución	Resolución del "encoder" por revolución	Desplazamiento lineal en mm por revolución
200	2000	1.058333
0.3	3	1.5874995e-3
0.2	2	1.058e-3

La siguiente prueba mide el desplazamiento del porta tuerca debido al giro del motor (ver Figura 27). Se muestra una gráfica que resulta de los pasos del motor en "X" y en "Y" la medición lineal del sensor LVDT en mm, gráfica 2 – Apéndice C. Se tiene una repetibilidad promedio de $1 \mu\text{m}$, resolución de $2 \mu\text{m}$, juego mecánico promedio de $1 \mu\text{m}$ y error de reversa máximo de $3 \mu\text{m}$ de donde $1.57 \mu\text{m}$ se puede atribuir al juego existente en la polea, y el resto a giros por imperfecciones geométricas y a la deformación de la tuerca debido al peso que soporta.

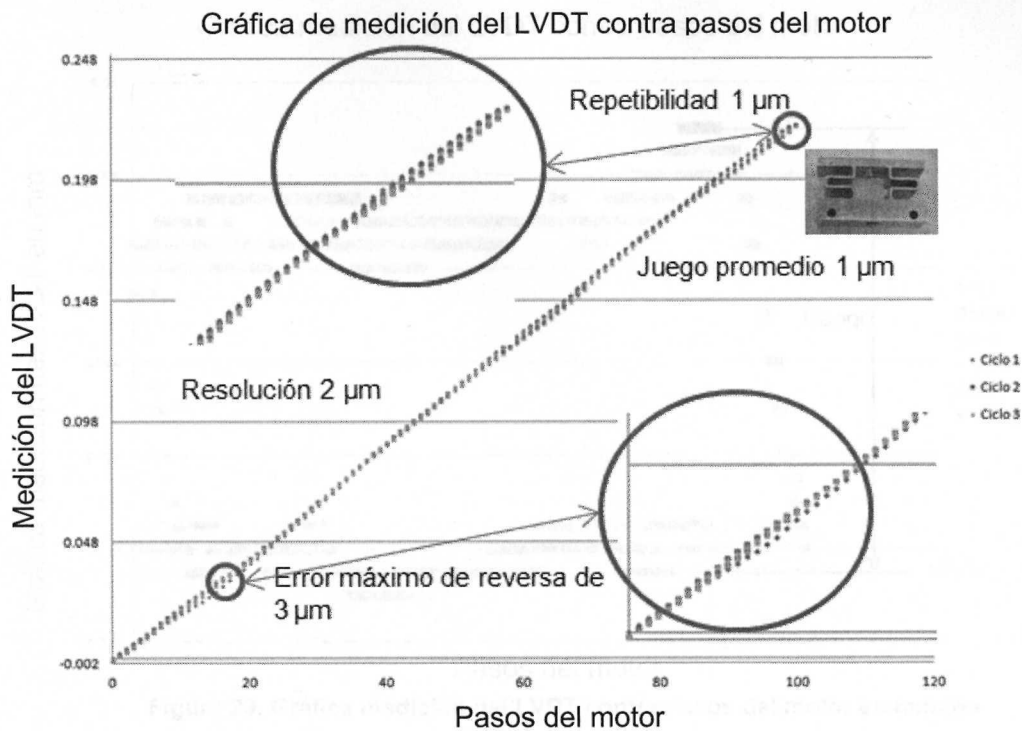


Figura 27. Gráfica medición del LVDT en mm contra pasos de motor [T1, P2, S].

Durante la operación, es posible apreciar visualmente un giro del sistema alrededor del eje "Y" (ϵ_y) debido a errores de manufactura de las guías (ver Figura 28). Se sabe que la distancia "a" equivale a 21.5 mm y "b" a 6 mm. Es posible cuantificar dicho error mediante una prueba de linealidad.

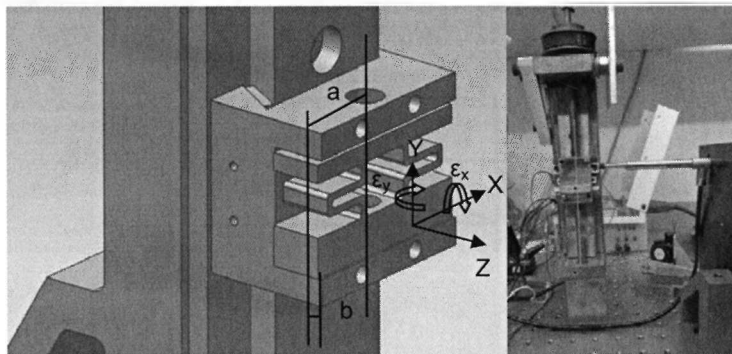


Figura 28. Errores de geometría debido a imprecisión en el maquinado.

La prueba de linealidad consiste en colocar el sensor LVDT a un extremo del porta tuerca, con el fin de verificar el desplazamiento debido a un ángulo de rotación. La prueba recorre 100 pasos de ida y vuelta por tres ciclos (ver Figura 29), gráfica 3- Apéndice C.

Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor

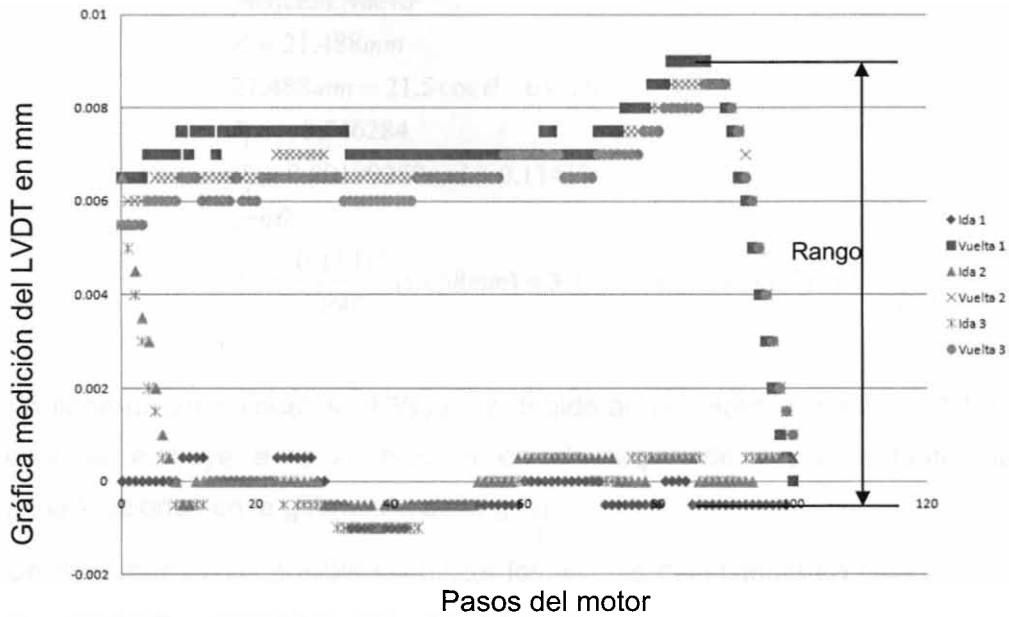
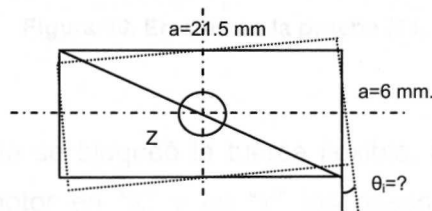


Figura 29. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor en mm (en posición lateral).

En la gráfica se muestra el desplazamiento del elemento móvil en dirección "X" debido a un giro en el eje "Y" (ϵ_y) (ver Figura 31). El elemento gira cuando se desplaza en una dirección y este giro se invierte rápidamente al inicio del cambio de dirección. Estos cambios de dirección representan un desplazamiento de 0.012 mm. Calculando la pérdida de giro debido a este desplazamiento, se tiene la Ecuación 11:



$$Z = (25 \cos \theta - 6 \sin \theta)i - (25 \sin \theta + 6 \cos \theta)j \quad (11)$$

Posicion.Nueva

$$Z = 21.488mm$$

$$21.488mm = 21.5 \cos \theta - 6 \sin \theta$$

$$\theta_1 = -0.546284$$

$$\theta_2 = 0.00199288rad = 0.1141^\circ$$

con θ_2

$$\Delta y = \frac{0.1141^\circ}{360^\circ} (1.058mm) = 3.35e-4mm = 0.3353\mu m \quad (12)$$

Se tiene un error lineal de $0.3353 \mu m$ debido al giro alrededor del eje "Y". El cual se atribuye a la imprecisión en el maquinado y por lo tanto las imperfecciones en la geometría de la guía.

De esta manera es posible identificar los errores del sistema en esta prueba por separado, como se muestra en la Figura 30.

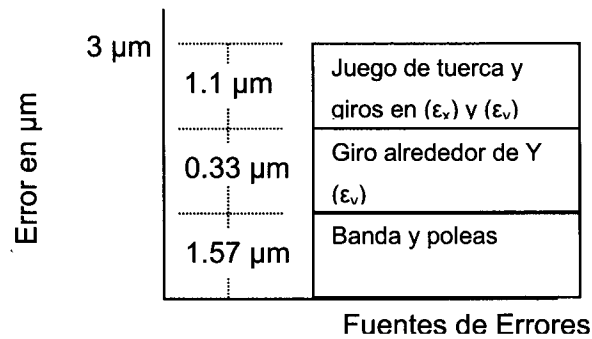


Figura 30. Errores en la prueba [T1, P1, S].

Prueba con bloqueo

En la siguiente prueba se bloqueó la tuerca flexible. Se obtuvo una gráfica con los pasos del motor en "X" y en "Y" los pasos contabilizados por el "encoder" acoplado al tornillo de potencia en "Y" (ver Figura 31), gráfica 4-Apéndice C. Donde se aprecia el mismo error que en la prueba anterior, debido al juego de la banda.

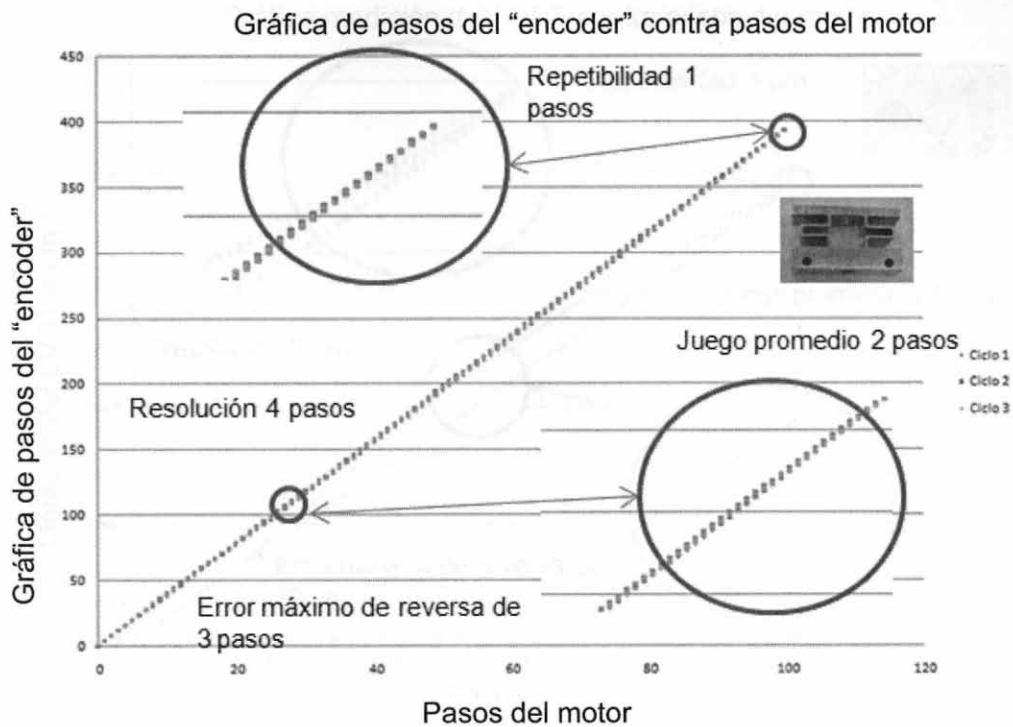


Figura 31. Gráfica pasos registrados en el "encoder" contra pasos de motor con bloqueo de la tuerca flexible [T1, P1, C].

La Figura 32 muestra la gráfica que resulta de los pasos del motor en "X" y en "Y" la medición lineal del sensor LVDT en mm, gráfica 4 – Apéndice C. Se tiene una repetibilidad promedio de $3 \mu\text{m}$, resolución de $2 \mu\text{m}$, juego mecánico promedio de $7.5 \mu\text{m}$ y un error de reversa máximo de $15 \mu\text{m}$. Este último error se atribuye en mayor medida al bloqueo que se indujo a la tuerca, es decir, la tuerca flexible pierde su sección de flexión y ya no puede eliminar el juego debido a la restricción de movimiento. Este bloqueo impide el funcionamiento de la tuerca flexible.

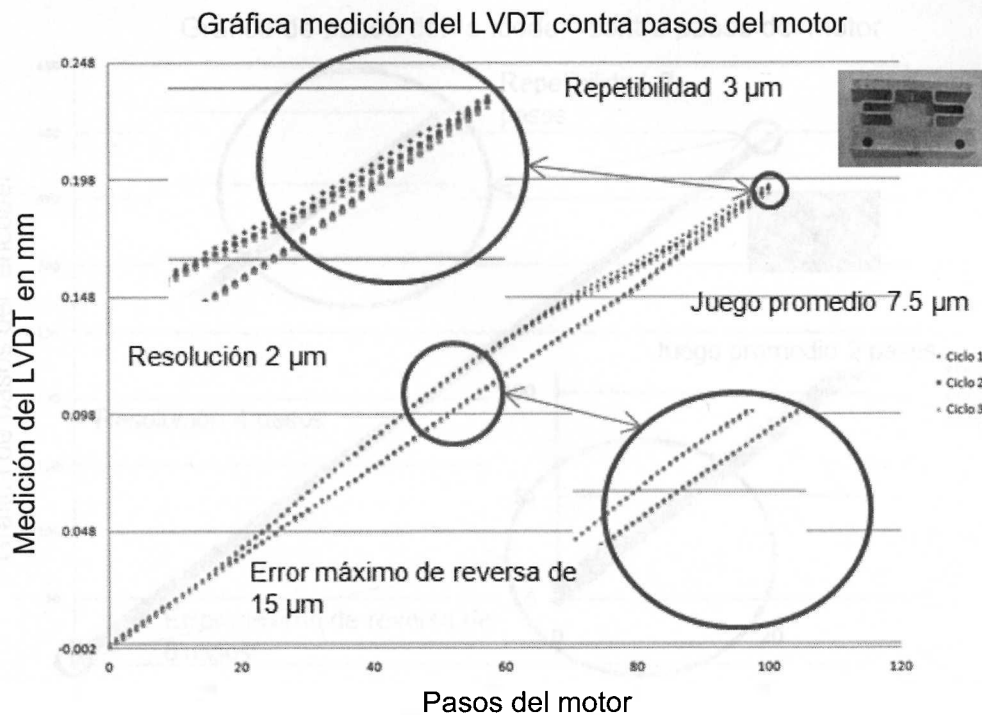


Figura 32. Gráfica medición LVDT en mm contra de pasos del motor con bloqueo de tuerca flexible [T1, P2, C].

2.10.2 Resultados con la tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce

Prueba sin bloqueo

El segundo elemento que se probó fue la tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce sin bloqueo. Se obtuvo una gráfica con los pasos del motor en "X" y los pasos contabilizados por el "encoder" acoplado al tornillo de potencia en "Y" (ver Figura 33), gráfica 5- Apéndice C. Se obtiene una resolución de 4 pasos del "encoder", repetibilidad promedio de 2 pasos, juego promedio de 2 pasos y un error máximo de reversa de 6 pasos, los cuales representan 3.174 μm de pérdida en el desplazamiento lineal.

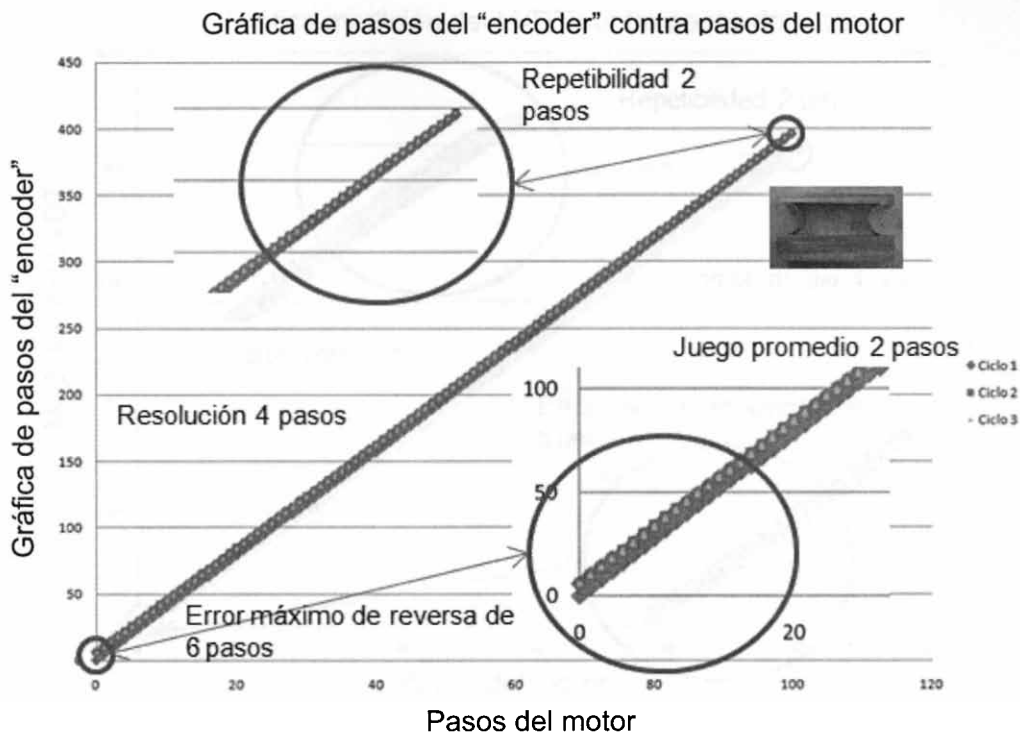


Figura 33. Gráfica pasos del "encoder" contra medición de pasos del motor [T2, P1, S].

La gráfica 7 Apéndice- C (ver Figura 34) muestra los pasos del motor en "X" y en "Y" la medición lineal del sensor LVDT en mm. Se tiene una resolución promedio de $2 \mu\text{m}$, error máximo de retorno de $6 \mu\text{m}$ repetibilidad promedio de $2 \mu\text{m}$ y un juego promedio de $4 \mu\text{m}$. Es posible atribuir $3 \mu\text{m}$ del error máximo de retorno y juego promedio al juego de la banda, así como también, es posible atribuir $2.86 \mu\text{m}$ al giro del porta tuerca debido a imperfecciones geométricas. Esta tuerca con inserto fue bloqueada en experimentos anteriores, es probable que en alguna de esas pruebas se excedió su módulo de cedencia y la tuerca quedó deformada plásticamente, razón por la cual tiene mayor juego que la tuerca de aluminio sin inserto con vigas en forma de "U".

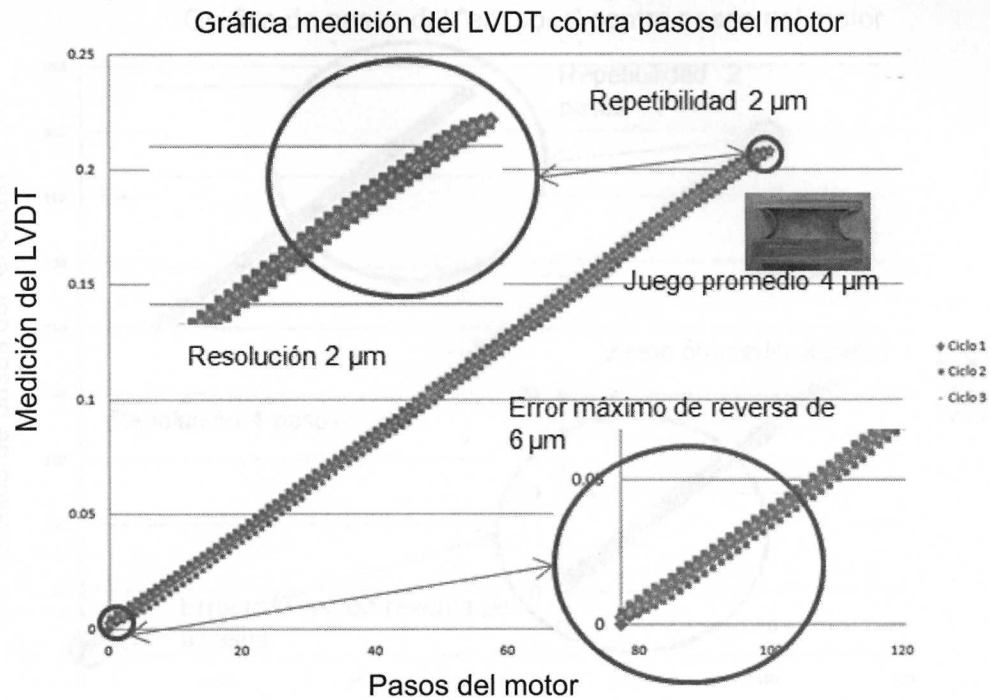


Figura 34. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor [T2, P2, S].

Prueba con bloqueo

En la siguiente prueba se bloqueó la tuerca flexible. Se obtuvo una gráfica con los pasos del motor en “X” y en “Y” los pasos contabilizados por el “encoder” acoplado al tornillo de potencia en “Y” (ver Figura 35), gráfica 7- Apéndice C. Se identifica una resolución de 4 pasos, repetibilidad promedio de 2 pasos, juego mecánico promedio de 2 pasos, y error de reversa máximo de 6 pasos, correspondientes a 3.174 μm de error lineal.

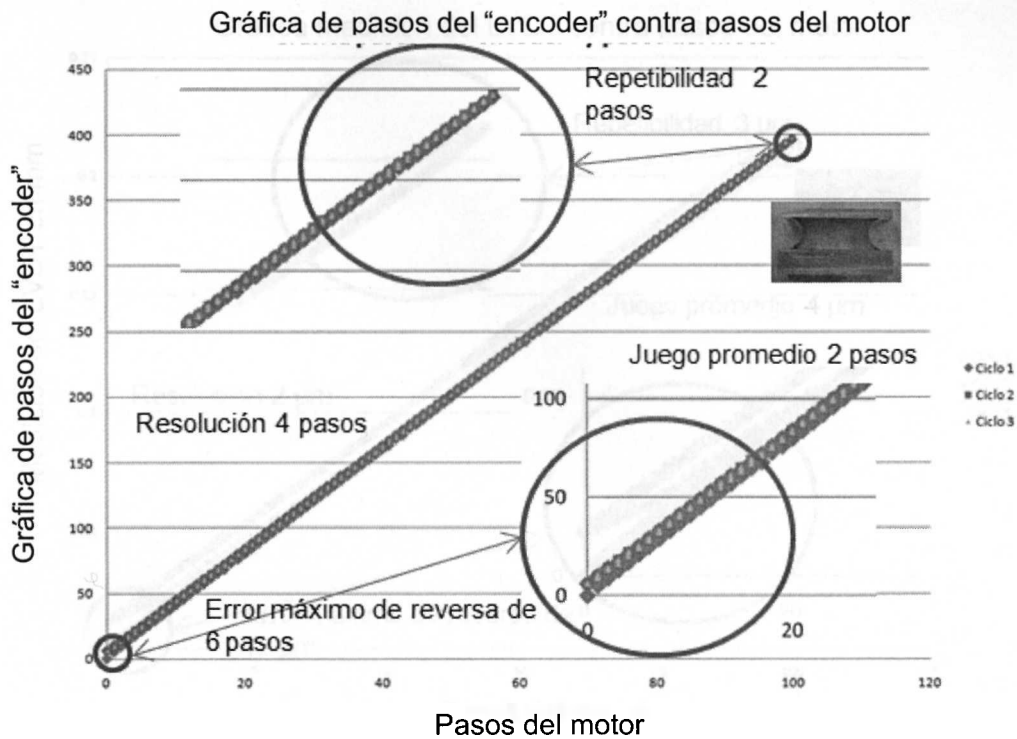


Figura 35. Gráfica medición de pasos del "encoder" contra pasos del motor [T2, P1, C].

La gráfica mostrada en la Figura 36, gráfica 8- Apéndice C, muestra los pasos del motor en "X" y la medición del LVDT en "Y". Se observa una resolución de 2 μm , repetibilidad promedio de 3 μm , juego mecánico promedio de 4 μm y un error máximo de reversa de 12 μm . Este error se atribuye al bloqueo que se le indujo a la tuerca, error por juego de la banda, giro del porta tuerca y finalmente por una deformación plástica de la tuerca inducida al realizar pruebas anteriores con bloqueo.

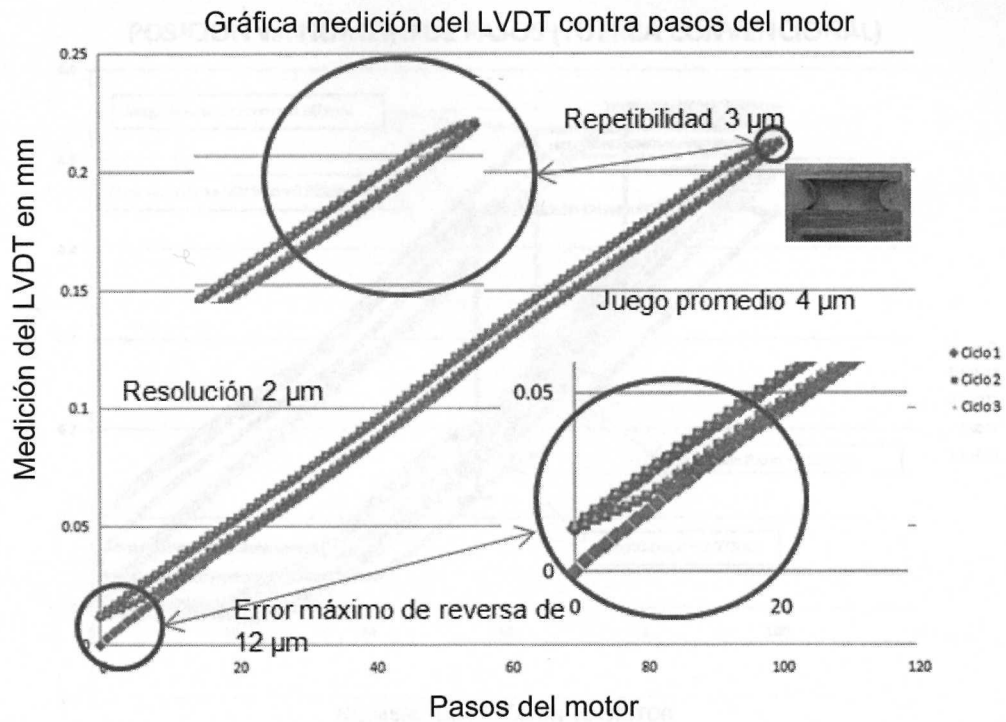


Figura 36. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor. [T2, P2, C].

2.10.3 Pruebas del posicionador presentado en [García, 2010]

Del trabajo de [García, 2010] donde se caracterizó una tuerca convencional se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 37.

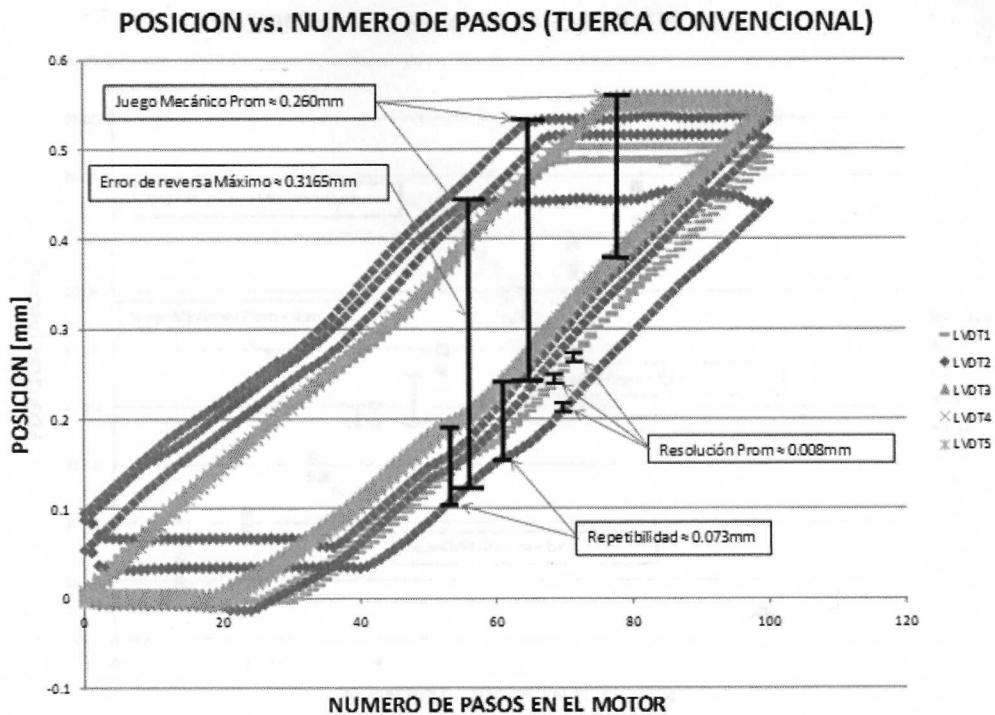


Figura 37. Gráfica de posición en mm y pasos del motor con tuerca convencional por [García, 2010].

Se muestra un juego mecánico promedio de 0.260 mm, error de reversa máximo de 0.3165 mm, resolución promedio de 0.008 mm y una repetibilidad de 0.073 mm.

Se muestra a continuación la misma prueba pero con el uso de la tuerca flexible de aluminio de vigas de flexión en forma de "U", los resultados se muestran en la Figura 38.

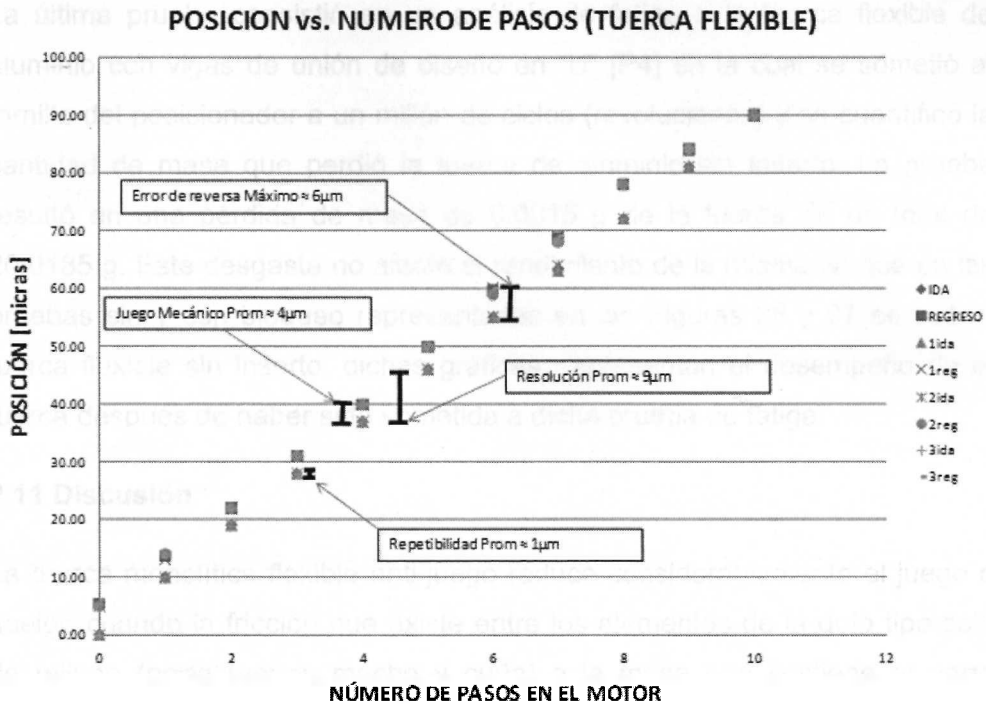


Figura 38. Gráfica de posición en mm y pasos del motor con tuerca flexible.

Se observan un error de reversa de $6\ \mu\text{m}$, juego mecánico de $4\ \mu\text{m}$, repetibilidad promedio de $1\ \mu\text{m}$ y una resolución promedio de $9\ \mu\text{m}$.

En resumen se comparan los resultados de todas las tuercas, ver Tabla 12.

Tabla 12. Comparación de resultados de las diferentes tuercas.

Tuerca	Bloqueo	Repetibilidad [μm]	Resolución [μm]	Juego [μm]	Error de reversa [μm]
Sin inserto	No	1	2	1	3
Sin inserto	Si	3	2	7.5	15
Con inserto	No	2	2	4	6
Con inserto	Si	3	2	4	12
Sin inserto [García 2010]	-	73	8	260	3165
Tuerca convencional [García 2010]	-	1	9	4	6

Se tiene una menor resolución en el último diseño del posicionador comparado con el diseño presentado en [García, 2010] debido a la reducción por las poleas, la banda y paso del tornillo. El juego también se reduce debido a la rigidez de la guía, la cual disminuye considerablemente el error potencial debido a giros del desplazador, sin embargo la repetibilidad permanece constante.

La última prueba consistió en un análisis de fatiga a la tuerca flexible de aluminio con vigas de unión de diseño en “U” [P4] en la cual se sometió al tornillo del posicionador a un millón de ciclos (revoluciones) y se cuantificó la cantidad de masa que perdió la tuerca de aluminio sin inserto. La prueba resultó en una pérdida de masa de 0.0015 g de la tuerca de un total de 20.0185 g. Este desgaste no afectó el rendimiento de la misma ya que en las pruebas sin y con bloqueo representadas en las Figuras 26 y 27 se usó la tuerca flexible sin inserto, dichas gráficas, representan el desempeño de la tuerca después de haber sido sometida a dicha prueba de fatiga.

2.11 Discusión

La tuerca monolítica flexible anti-juego reduce considerablemente el juego o huelgo cuando la fricción que existe entre los elementos de la guía tipo cola de milano (porta tuerca, macho y cuña) o la masa que sostiene el porta tuerca no excede la fuerza necesaria para flexionar a la tuerca flexible, ya que de otro modo pierde movimiento de rotación hasta que se comprime o extrae y comienza a transmitir el movimiento.

Los errores geométricos de las partes y elementos del posicionador propician al giro del elemento desplazador y propagan error al desplazamiento lineal. Estos errores se ven traducidos como un error volumétrico entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Durante la transmisión del movimiento de rotación del motor de pasos a la banda y poleas, existe una pérdida considerable, esta se ve reflejada en el desempeño final del posicionador en el desplazamiento lineal.

La prueba de fatiga consistió en un millón de revoluciones del tornillo de potencia, inducidas por el motor a pasos. El desgaste en la prueba de fatiga fue de 0.0015 g. El desempeño de la tuerca no se vio afectado por su desgaste.

El diseño de la tuerca flexible de aluminio con inserto de bronce y vigas en forma semicircular es más sensible a fuerzas con una relación aproximadamente de 1:10 con respecto a la tuerca flexible de aluminio y vigas de diseño en “U”.

2.12 Conclusiones

Se diseñó y construyó un posicionador que tiene una resolución de 2 μm , repetibilidad y juego promedio de una micra, parámetros mecánicos suficientes para realizar el proceso de μEDM . Se redujo la resolución del sistema anteriormente desarrollado usando la misma tuerca flexible pero una transmisión de movimiento de rotación diferente al anterior. Esta última transmisión de movimiento representa uno de los juegos más considerables del sistema actual del posicionador junto con el atribuible al giro del porta tuerca debido a imperfecciones geométricas.

El posicionador sirvió para realizar una prueba de fatiga a la tuerca flexible, dicha prueba tuvo una duración de varios días de trabajo continuo. En dicha prueba, se demostró que el desempeño de la tuerca no se ve afectado por el desgaste.

El desempeño de la tuerca flexible se ve afectado por la fricción que pudiera haber en los elementos de la guía tipo Cola de Milano y el peso de los elementos que se desea desplazar, además dicho desempeño fue el mismo en la inclusión a ambos diseños del posicionador. El desempeño del sistema mejoró con respecto al posicionador anterior debido a los componentes del nuevo diseño.

La transmisión de movimiento de rotación del motor al sistema de poleas y bandas presenta un juego considerable y errores máximos de regreso, estos errores contribuyen al error en la posición lineal del posicionador. El sistema posicionador desarrollado se realizó bajo el concepto de bajo costo, ya que la manufactura de la mayoría de los componentes fue de mano de obra propia.

Capítulo III. Sensor de posición basado en el principio de interferometría láser

3.1 Antecedentes del sensor de posición

Los proveedores de máquinas herramientas emplean la interferometría láser para la calibración de sus productos apoyándose en normas internacionales estandarizadas por la ASME (B5 TC52) y la ISO (230 TC39). Las técnicas de interferometría son empleadas para asegurar la linealidad en guías y la precisión del desplazamiento de la maquinaria de control numérico. Los sistemas de interferometría comerciales tienen costos del orden de miles de dólares, debido a los componentes ópticos, electrónicos y mecánicos que lo componen [Ahuett, 2010]. El desarrollo de tecnología de bajo costo que permita acercar al pequeño productor a la tecnología de interferometría láser potencializaría sus capacidades para ofrecer manufactura de alta calidad [Hisatome, 2005]. De lo anterior se advierte la necesidad de desarrollar tecnología de medición láser de bajo costo.

Se llevó a cabo el diseño de un arreglo foto detector para ser probado con un arreglo de interferómetro Michelson dentro en el departamento de óptica de la Universidad de Esslingen campus Goepingen [Ahuett, 2009]. La figura 39 presenta los diferentes elementos que componen el montaje. El espejo móvil del arreglo está montado sobre una plataforma deslizante con baleros recirculantes la cual se puede desplazar de manera controlada con la ayuda de un micrómetro. El micrómetro utilizado en el montaje tiene una resolución de un micrómetro de desplazamiento en la escala fina.

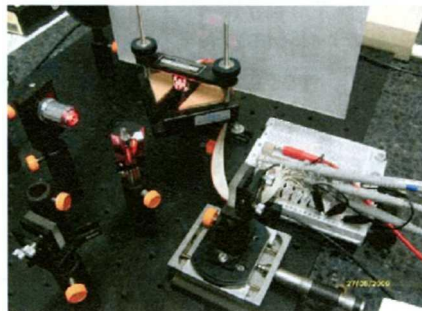


Figura 39. Interferómetro para pruebas, empleando componentes comerciales.

Se realizaron pruebas tratando de verificar que los pulsos reportados por el fototransistor correspondieran a los calculados considerando un pulso por cada desplazamiento de valor de $\lambda/2$ (633 nm/2). Se realizó un desplazamiento de 2 micrones utilizando el espejo móvil. Se consiguieron conteos de entre 3 y 4 pulsos como lo muestra la Figura 40. El conteo de pulsos resultó el esperado. Una vez comprobada la medición con el foto detector, se presenta la necesidad de obtener los elementos mecánicos que propicien la alineación para crear un sensor de posición en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, sin dejar de lado el concepto de bajo costo.



Figura 40. Pulsos registrados en el osciloscopio.

3.2 Sistemas comerciales de interferómetros de Michelson

Tabla 13. Análisis de mercado de interferómetros de medición láser.

Elemento	Marca	Característica técnicas	Precio USD
Instrumento de medición láser LS 10/LN10	Lasertex	Carrera 30 m Resolución de 1 nm Velocidad de 1 m/s	10500
Sistema de medición láser LSP30-3D/W(wireless)	Lasertex	Carrera 30 m Resolución de 0.001 μm Velocidad de 0.3 m/s	21900
LEOI-18	Lambda scienfitic	Carrera de 5 a 10 mm Resolución 0.5 μm	1258
LEOI-20	Lambda scienfitic	Carrera de 80 mm Resolución de 0.25 μm	1688

Los primero dos interferómetros de la Tabla 13 son para mediciones de mayor dificultad, para máquinas altamente especializadas. La capacidad de medición de velocidad aumenta su precio considerablemente así como también sus campos de operación. Los últimos dos interferómetros son útiles para mediciones en menor escala.

Destaca el uso tanto en las referencias bibliográficas como en los sistemas de interferometría comerciales, de un dispositivo para alineación de los espejos que reflejan el haz de luz ver Figura 41 el precio de este componente varía entre 79 y 109 USD dependiendo de las dimensiones y numero de actuadores.

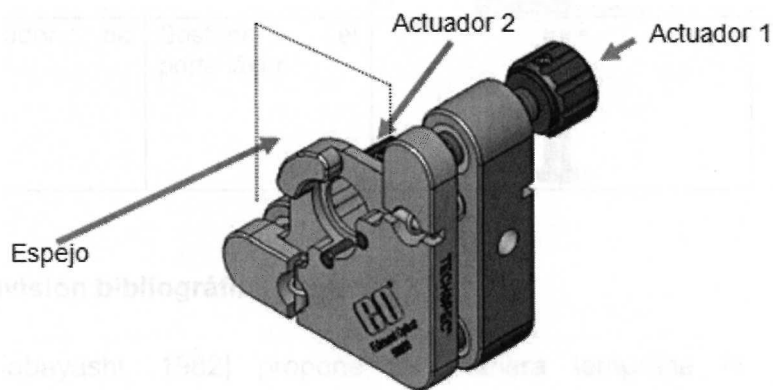


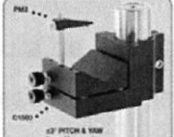
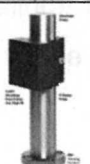


Figura 41. Dispositivo de uso frecuente para alineaciones de espejos.

Visto de frente, la forma de alinear al espejo es mediante la introducción del actuador uno si se desea girar el espejo hacia la izquierda y abajo y del actuador 2 si se desea girar al espejo hacia la derecha y arriba. El movimiento de un grado a través de cada eje coordinado, repercute en el movimiento del otro grado de libertad en forma mínima.

Otros componentes comerciales son los mostrados en la Tabla 14:

Tabla 14. Otros componentes comerciales de uso común para interferómetros.

Elemento	Función	Imagen	Precio USD
Láser y porta láser	Sostener al láser e inducir el haz de luz		564
Separador del haz de luz	Separar la luz		265
Porta láser	Sostener al láser		245
Controlador de altura	Sostener el porta láser		53.6

3.3 Revisión bibliográfica

En [Kobayashi, 1982] propone de manera temprana el empleo de semiconductores láser para la medición de calidad en instrumentos ópticos. Su propuesta es capaz de medir divergencias en el contorno de superficie de equipos ópticos de hasta 7 micrones. Aplicaciones de sustitución de láseres de gas por semiconductores se originan a partir del menor costo de estos últimos. Esta aplicación es de uso en industrial, en manufactura automatizada, robótica, componentes de control de calidad superficial e instrumentación medica.

[Ura, 1989] propone la implementación de sensores ópticos de desplazamiento integrados. Dichos sensores encapsulan en un mismo dispositivo la óptica y los sistemas electrónicos de emisión de luz láser y detección necesarios para interferometría. Estos se componen de un par de fotodiodos en una guía de onda de vidrio en un sustrato de silicón acoplados en los extremos un diodo láser simple. El dispositivo fue probado en carreras de 15 cm y una resolución de 0.39 μm . La fabricación de dispositivos

integrados requiere de equipo altamente especializado para micro manufactura, el Electro Beam. La técnica de Electrón Beam fue ampliamente utilizada el desarrollo del dispositivo. Los equipos de Electrón Beam requieren instalaciones de soporte altamente especializadas en manufactura electrónica.

[Hisatome, 2005] planteó la posibilidad de desarrollar equipo de interferometría láser para el apoyo de la industria de países en desarrollo. El objetivo del trabajo es calibrar cintas métricas de longitud considerable mediante un láser de medición. Se estudian los efectos que afectan la calibración, como por ejemplo, la temperatura de la viga, nivel de humedad y la presión atmosférica. Se presentan resultados positivos en cuanto a calibraciones láser. La exactitud prevista al calibrar este tipo de cintas es de 50 μm . Dicho sensor es para carreras largas, lo que lo hace incompatible con el prototipo fabricado en este documento.

En [Miranda, 2007] presenta el desarrollo de un sistema de interferometría láser basado en interferómetro Michelson. El desplazamiento se hace mediante un sistema de acople de un motor de corriente continua en un caso y en el siguiente caso con un motor a pasos. Se busca determinar las características del desplazamiento como distancia absoluta, intervalos de aceleración y desaceleración, velocidad uniforme y uniformidad en el desplazamiento. El sistema incorpora una cámara de video que mediante algoritmos de procesamiento digital obtiene características de desplazamiento. El sistema incorpora un LVDT para obtención de medida complementaria y validación. El sistema permite un estudio detallado de la calidad de acoplamiento motor-tornillo en sistemas de traslación lineal en un eje. La necesidad de una cámara así como el correspondiente procesamiento de los datos en un equipo de cómputo aumentan el costo de implementación del sistema. La medición se puede llevar en una velocidad de hasta 10 m/seg.

[Dinh, 2007], hace uso de un arreglo piezoeléctrico para realizar los movimientos y también reducir la vibración existente en el espejo móvil de un interferómetro Michelson ya que se hace énfasis en el movimiento erróneo que un tornillo puede proporcionar. Su sistema utiliza un láser de gas como

fuente de luz coherente y monturas de espejos muy similares a las comerciales. El arreglo que ejemplifica el uso de materiales de fácil adquisición para la fabricación de un interferómetro. Al igual que la aplicación mostrada en este documento, este interferómetro aísla la vibración mediante una mesa anti vibraciones neumática.

Trabajos anteriormente desarrollados muestran el concepto del interferómetro sin especificar en las características de los componentes utilizados, por lo que se realizó una búsqueda de patentes.

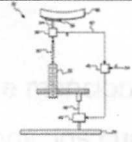
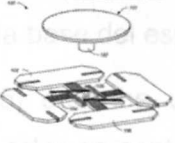
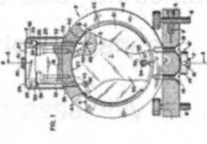
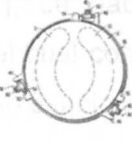
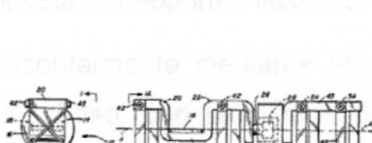
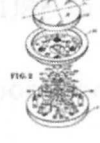
Tabla 15. Tabla resumen de revisión bibliográfica.

Característica \ Autor	Kobayachi (1982)	Ura (1989)	Miranda (2007)	Dinh (2007)	Tesis Actual (2010)
Cámara de video					
Sensores ópticos		X			
Electro Beam		X			
Piezo eléctrico				X	
Semi conductor	X				
Sensor diodo láser					X
Láser de gas helio				X	
Prueba de validación			X		X
Carrera (cm)	200	15	<1	0.0015	5
Resolución (μm)	7	0.39	14.6	0.6328	0.3175

3.3.1 Análisis de patentes

El análisis de patentes relacionadas con la alineación de elementos se muestra en la Tabla 16:

Tabla 16. Resumen de patentes.

Patente		Características
US4875764		Estructura monolítica Varios actuadores colocados entre la estructura y el espejo
US6533947		Actuador electromecánico Variedad de forma de espejo Espesor del espejo 25 μm .
US2907246		Alineación vertical únicamente Uso de pernos para ajustar la alineación
US4540251		Los actuadores son bombas termoelectricas de calor en contacto con elementos flexibles
US4861125		Aparato óptico para detección de fallas Driver electromagnético Dos pares de soportes
US5040860		Alineación mediante opresores 3 Elementos flexibles sirven de soporte

Existen varios dispositivos conocidos en el estado del arte, que poseen ciertas características similares con el porta espejo flexible motivo de éste documento.

En la patente [US4875764, 1989], se refiere a un espejo montado y alineado mediante un actuador controlado según la posición deseada. Varios actuadores inducen el movimiento de un actuador dispuesto entre el espejo y la estructura monolítica.

En el documento titulado "Microelectromechanical mirror and mirror array" con número de patente [US6533947, 2003], se especifica un espejo alineado

horizontalmente mediante un sistema electromecánico, el cual es diferente del aquí propuesto, ya que es de manipulación manual. El espejo puede ser de diversas formas geométricas con la peculiaridad que su tamaño debe ser del orden de los micrómetros. Las alineaciones que son posibles realizar son muy precisas.

La patente [US2907246, 1959] se menciona un espejo alineado verticalmente únicamente, mediante unos pernos, los cuales se encuentran montados en la base donde también se monta la base del espejo.

La patente [US4540251, 1985] describe un espejo, el cual es alineado mediante bombas térmicas de calor en contacto con elementos flexibles con el fin de eliminar distorsiones de imágenes.

En el documento "Suspension assembly for a scanning mirror", con número de patente [US4861125, 1989], se hace referencia a un aparato para escaneo y detección de fallas, el cual consta de una base estacionaria y un driver electromagnético, donde un espejo es montado en la parte en forma de "U" del dispositivo compuesta por soportes flexibles.

Un espejo alineado horizontalmente mediante opresores, los cuales están colocados debajo de una base, con elementos flexibles que sostienen al espejo, es descrito en la patente [US5040860, 1991].

3.4 Arquitectura del sensor de posición

El interferómetro de Michelson es un instrumento que permite medir distancias del orden de los nanómetros. En el prototipo de sensor de posición basado en interferometría láser de Michelson presentado se pretende realizar la medición mediante el conteo de franjas en un patrón de interferencia circular mientras se incrementa o disminuye la distancia del camino óptico de un elemento móvil [Malacara, 2007].

En este prototipo la alineación de los elementos ópticos representa un papel muy importante para lograr la medición. Otra función de importancia clave es el desplazamiento del espejo móvil. Este trabajo se limita únicamente al diseño del sistema mecánico.

Es posible diferenciar los sistemas que componen al posicionador mediante la arquitectura del sensor, ver Figura 42.

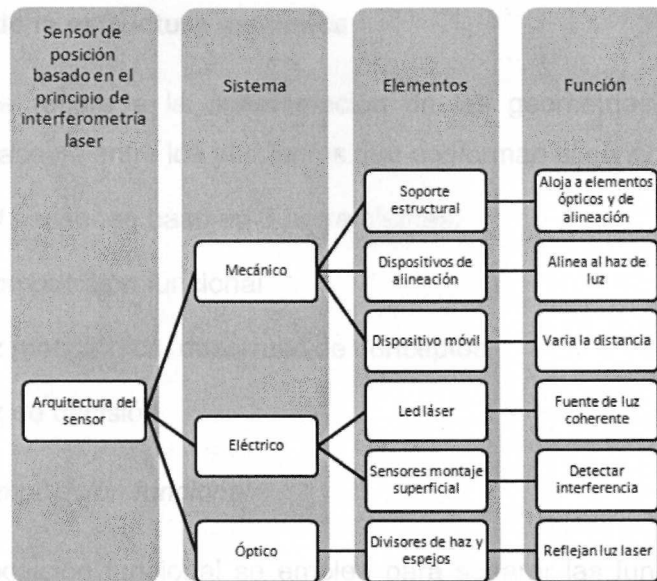


Figura 42. Arquitectura del sensor de posición.

Se identifican 3 sistemas principales en el sensor; eléctrico (led láser y foto detectores), óptico (espejos y separadores del haz de luz) y mecánico (soportes estructurales, dispositivos de alineación y móviles).

3.5 Metodología de diseño

La metodología utilizada para el diseño del sensor de posición se basó en:

1. Definición de la función de desempeño del sistema mecánico del sensor
2. Investigación del funcionamiento de los sistemas mecánicos del sensor
3. Diseño y validación de las estructuras y elementos mecánicos
4. Construcción y ensamble de los componentes

Gracias a la prueba realizada en la Universidad de Esslingen campus Goepingen se sabe que la principal función del sistema mecánico es realizar el movimiento de los espejos para alinear al haz de luz y posteriormente desplazar a un espejo para medir mediante el patrón de interferencia. Este desplazamiento se tiene que llevar a cabo sin perder la alineación. Además el

sistema debe ser robusto; insensible a cambios de temperatura y vibraciones externas [Ahuett, 2009].

3.6 Diseño de la estructura mecánica

El diseño se refiere a la determinación de las geometrías, materiales y métodos de acople entre los elementos que conforman el sensor.

El diseño del sensor se basó en 3 herramientas:

1. Descomposición funcional
2. Matriz morfológica, desarrollo de conceptos
3. Matriz de decisión

3.6.1 Descomposición funcional

La descomposición funcional se emplea para separar las funciones que un sistema debe desempeñar. Para el caso del sensor, se identifican como principales funciones activas: alinear los espejos, desplazar al espejo móvil. Como funciones pasivas se tiene: Soportar a los otros elementos, eliminar vibraciones y eliminar expansión térmica.



Figura 43. Descomposición funcional del sensor.

3.6.2 Matriz morfológica, desarrollo de conceptos

La matriz morfológica es un auxiliar en la búsqueda de los componentes y elementos óptimos para el diseño del posicionador ya que muestra diversas opciones. En base a las funciones del sensor se presentan las siguientes opciones para realizarlas.

Tabla 17. Matriz morfológica del sensor de posición.

Funciones	Posibles soluciones		
1. Alinear espejos	1.A Porta espejo flexible	1.B Porta espejo comercial	1.C Sensores ópticos
2. Desplazar linealmente	2.A Tornillo de acople	2.B Actuador PTZ	2.C Micrómetro
3. Soportar otros elementos	3.A Bases roscadas	3.B Bases comerciales	
4. Eliminar vibraciones	4.A Mesa anti vibraciones	4.B PZT anti vibración	4.D Elementos de acero
5. Evitar expansión térmica	5.A Componentes del mismo material	5.B Componentes comerciales	5.C Componentes de plástico

Se desarrollan conceptos uniendo las posibles soluciones para cada función de la matriz morfológica. Se proponen tres conceptos, donde el primero es uno compuesto por elementos comerciales, el segundo el corresponde al sensor reportado en esta tesis y el tercero de los elementos que restan de la matriz morfológica.

Tabla 18. Concepto 1 del diseño del sensor.



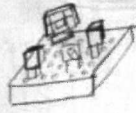
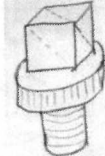
Función	Solución	Bosquejo
1. Alinear espejos	1.B Porta espejo comercial	
2. Desplazar linealmente	2.D Actuadores neumáticos	
3. Soportar otros elementos	3.B Bases comerciales	
4. Eliminar vibraciones	4.B PZT anti vibración	
5. Evitar expansión térmica	5.B Componentes comerciales	

Tabla 19. Concepto 2 del diseño del sensor.

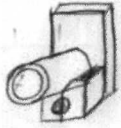
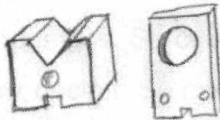

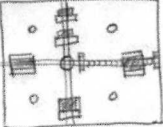


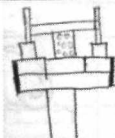
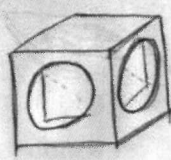
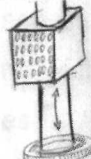
Función	Solución	Bosquejo
1. Alinear espejos	1.A Porta espejo flexible	
2. Desplazar linealmente	2.A Tornillo de acople	
3. Soportar otros elementos	3.A Bases roscadas	
4. Eliminar vibraciones	4.A Mesa anti vibraciones	
5. Evitar expansión térmica	5.A Componentes del mismo material	

Tabla 20. Concepto 3 del diseño del sensor.

Función	Solución	Bosquejo
1. Alinear espejos	1.C Sensores ópticos	
2. Desplazar linealmente	2.C Micrómetro	
3. Soportar otros elementos	3.B Bases comerciales	
4. Eliminar vibraciones	4.D Elementos de acero	
5. Evitar expansión térmica	3.B Bases comerciales	

3.6.3 Matriz de decisión

Se califican las opciones de acuerdo a los parámetros de criterio mediante una matriz de decisión dentro de los tres conceptos propuestos. Se califica (-1) un concepto malo, (0) sin diferencia y (1) a una mejor opción. Se continúa con el concepto que obtiene una mejor calificación con respecto a las otras.

Tabla 21. Matriz de decisión del sensor.

Parámetro de criterio	Concepto 1 (Anterior)	Concepto 2 (Actual)	Concepto 3
Bajo costo	0	1	-1
Facilidad de manufactura	1	1	-1
Insensible a vibraciones	0	1	1
Facilidad de acople a elementos de medición	1	1	1
Portabilidad	1	1	0
Facilidad de ensamble con otros componentes	1	1	0
Mantenimiento	1	1	-1
Tecnología innovadora	-1	1	-1
Facilidad de uso	1	-1	0
Insensible a cambios de temperatura	0	-1	1
Total	5	6	-1
Rango	2	1	3
Continuar	No	Si	No

Se encuentra que los componentes que deben conformar al posicionador para las funciones establecidas son los establecidos en el concepto 2; Porta espejo flexible, tornillo de acople, bases roscadas para el soporte de otros elementos, mesa anti vibraciones y componentes del mismo material para generalizar la expansión térmica. Destacan como principales diferencias el bajo costo, la facilidad de manufactura, nulo mantenimiento y el la innovación tecnológica que representa el concepto 1 con respecto a los sistemas 1 y 2.

3.7 Construcción y validación del sistema mecánico

Dado que es necesaria la sujeción y alineación de elementos colocados uno en frente de otro como se muestra en la Figura 44 es necesario el diseño y construcción de elementos porta espejos, porta separadores de luz y porta elementos electrónicos para conformar el prototipo.

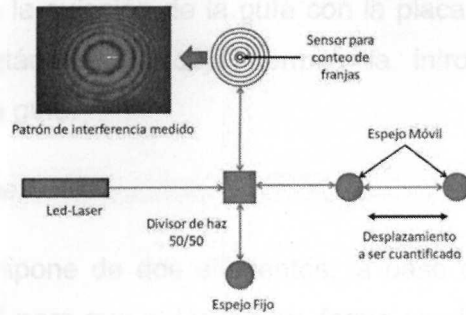


Figura 44. Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson.

Basados en el esquemático se propone el diseño del prototipo del sensor de posición basado en interferometría láser mostrado en la Figura 45.

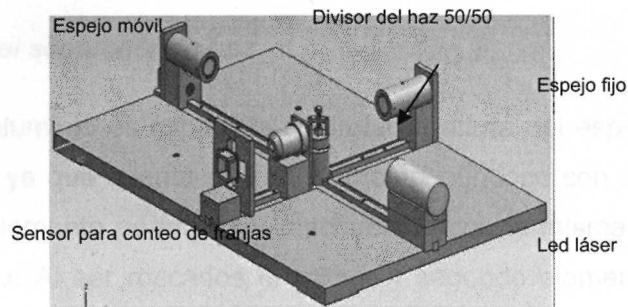


Figura 45. Diagrama CAD del diseño del interferómetro de Michelson.

Todos los elementos mecánicos de soporte son de aluminio, con la excepción de los tornillos de ajuste, ensamble y de potencia así como también los rodamientos.

El detalle del dimensionamiento de las piezas se muestra en el Apéndice B, a continuación se presentan las características más importantes de los elementos que componen al sensor de posición.

3.7.1 Placa

Las dimensiones de la placa son 15"x10" y un espesor de 1/2", tiene dos ranuras para ajustar el canal donde las guías son colocadas. Además de cuatro barrenos para la sujeción a la mesa neumática.

3.7.2 Guías

Las guías cortas tienen dimensiones de 1/4" x 1/4" x 4.5" y las guías largas de 1/4" x 1/4" x 15" hechas de aluminio y con barrenos machuelados con una

respectiva caja para la sujeción de la guía con la placa mediante el tornillos de 5/40" rosca estándar. La caja permite la introducción del tornillo completamente en la guía.

3.7.3 Soporte del láser

Este soporte se compone de dos elementos; la base que sostiene el láser tiene un canal en "v" para que el láser cuya forma es cilíndrica, se apoye. El segundo elemento es la base sobre la que descansa el soporte en "v", este segundo elemento además facilita al acople con la guía de la placa del prototipo del sensor de posición ya que tiene una ranura en su parte inferior.

3.7.4 Soporte del separador de haz

Esta base de aluminio es capaz de controlar la altura del espejo separador del haz de luz, ya que cuenta con un elemento cilíndrico con una extensión roscada y un elemento perforado y machuelado con la misma rosca que el primer elemento. Al ser roscados el primer y segundo elemento, se puede variar la altura del haz separador de luz.

3.7.5 Soporte porta objetivo

El soporte porta objetivo consta de una base cubica y una base vertical roscada, ambas cuentan con una ranura en la parte inferior de su geometría para el acople a la guía de la placa del prototipo del sensor de posición. La rosca es estándar de diámetro exterior 4/5" y diámetro interior 19/25".

3.7.6 Soporte del arreglo de fototransistores

Este soporte sostiene al arreglo de fototransistores mediante unos tornillos de rosca 5/40" estándar que se atornillan al arreglo de fototransistores. El soporte consiste en una base cubica atornillada a una base vertical ver Figura 46.

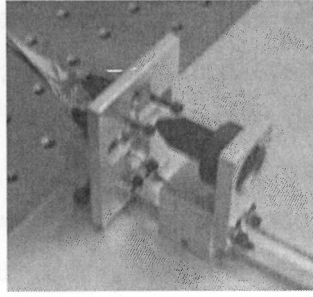


Figura 46. Soporte del arreglo de fototransistores.

3.7.7 Tornillo

El tornillo con el que se mueve al espejo móvil es de 5/16" 24 UNF. Dicho tornillo es de acero inoxidable y es accionado manualmente para propiciar el movimiento.

3.7.8 Chumaceras

Las chumaceras tienen un diámetro de media pulgada, en estos barrenados se ensamblan los rodamientos que sostienen al tornillo. La chumacera tiene barrenos laterales, los cuales sirven para la sujeción de la misma mediante tornillos a la placa del sensor de posición.

3.7.9 Rodamientos

Los rodamientos son de diámetro exterior de 1/2" y de diámetro interior de 1/5", estos rodamientos dan soporte mediante las chumaceras al movimiento circular del tornillo.

3.7.10 Porta espejo flexible

El porta espejo flexible es capaz de alinear o ajustar un espejo en un sistema en dos grados de libertad. El movimiento del espejo se realiza de forma individual o simultánea y en cada una de las dos direcciones del plano cartesiano, facilitando la alineación del mismo. La repercusión del movimiento en un grado de libertad es mínima en la dirección del segundo grado de libertad.

El porta espejo flexible está conformado por 4 secciones: una base rectangular (8) ver Figura 47, una base vertical sostenedora (9) un cartucho cilíndrico de aluminio (7) y un cartucho flexible de nylamid (2). La parte superior de la base (8) tiene una hendidura en forma de cuña, que ayuda a dar rigidez a la estructura, sobre la cual va montado el cartucho de aluminio (7), el cual contiene en su interior al cartucho flexible (2), el cual es extraíble ver Figura 48. En la parte inferior de la base (8) y (9), se tiene una hendidura que sirve como punto de agarre de la estructura con la guía.

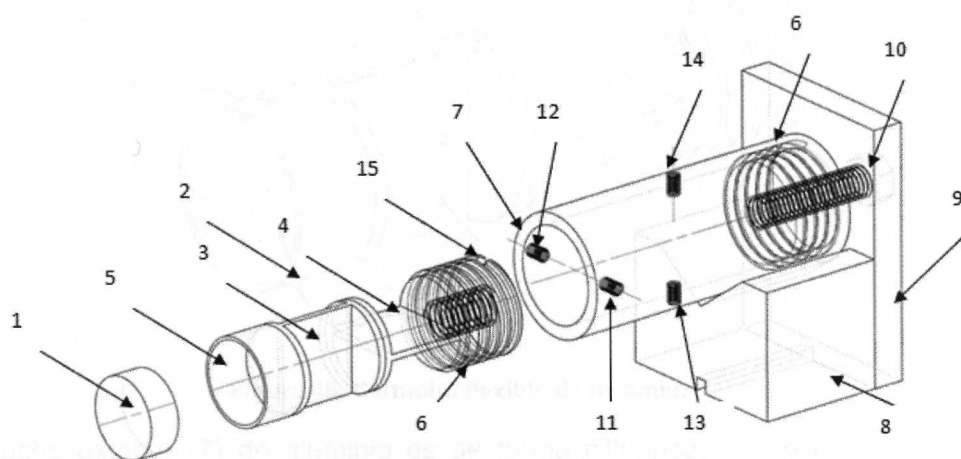


Figura 47. Porta espejo flexible.

Los elementos que componen al porta espejo flexible son:

1. Espejo
2. Cartucho flexible de nylamid
3. Primer elemento flexible
4. Segundo elemento flexible
5. Porta espejo
6. Rosca del cartucho flexible
7. Casquillo exterior de aluminio
8. Base rectangular
9. Base vertical
10. Tornillo de sujeción
11. Tornillo de ajuste
12. Tornillo de ajuste
13. Tornillo de ajuste

- 14. Tornillo de ajuste
- 15. Tope de roscado

La base vertical (9) es una placa de aluminio, en la parte superior tiene una hendidura, por el cual se introduce un tornillo y rondana (10) que une al cartucho flexible (2), al cartucho de aluminio (7) y la base vertical (9).

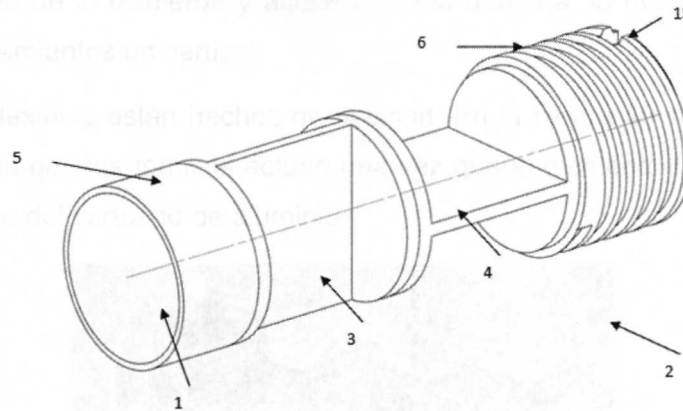


Figura 48. Cartucho flexible de nylamid.

El cartucho exterior (7) de aluminio es de forma cilíndrica, y hueca en su interior, ambos extremos están abiertos, en la periferia exterior del cartucho (7), se encuentran 4 orificios pasantes (11, 12, 13, 14), los primeros dos orificios coinciden con el elemento de unión medio y se encuentran separados 180° entre sí y dos segundos orificios coinciden con el porta espejo (5), también separados 180° entre sí, a través de ellos son introducidos tornillos que sirven como actuadores para mover mediante un apriete y afloje simultáneo de los tornillos, a un primer y un segundo elemento flexibles (3 y 4). En el interior del cartucho, en el extremo que colinda con la base vertical sostenedora, se tiene una cuerda (6), que sirve para ensamblar al cartucho con una rosca exterior (6) del cartucho flexible.

El cartucho flexible (2), es un elemento de una sola pieza conformado por un espejo (1), una sección porta espejo (5), un primer elemento flexible (3), un elemento de unión medio de forma circular, un segundo elemento flexible, y al final una rosca exterior (6) sobre la que se encuentra un tope de fijación

(15), que limita el atornillado para permitir el ajuste del primer y segundo elementos flexibles con los 4 orificios pasantes del cartucho exterior.

Dispuestos los elementos de esta manera, se permite trabajar en la alineación del porta espejo para la reflexión precisa del haz de luz del láser mediante el apriete y afloje de los tornillos actuadores, por ejemplo, visto de frente, si se necesita girar el espejo de izquierda a derecha se tendrá que apretar el tornillo de la izquierda y aflojar el de la derecha, lo mismo ocurre con los desplazamientos en vertical.

Los cartuchos flexibles están hechos de nylamid. En la Figura 49 se aprecia la dirección en la que los tornillos actúan una vez que el elemento flexible se encuentra dentro del cartucho de aluminio.

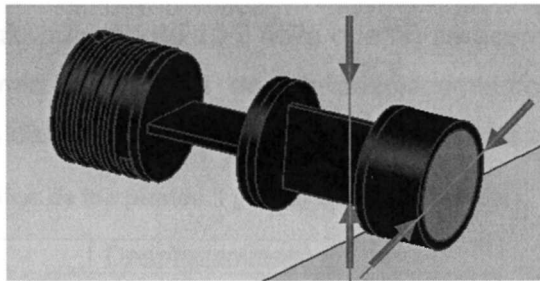


Figura 49. Actuación de los tornillos sobre los cartuchos flexibles porta espejo.

Con el fin de comprobar que no se excede el esfuerzo de cedencia del cartucho flexible de nylamid de 52.13 MPa se realiza un análisis de elemento finito en Comsol. Se ocupó una malla de 30568 elementos cuadráticos y se indujo un desplazamiento de 0.5 mm en la dirección “-Y” en el punto 1 y un desplazamiento de 1 mm en la dirección “-X” en el punto 2. Estos desplazamientos se deben a que la máxima deformación que se le puede inducir al cartucho flexible de nylamid cuando se ensambla al cartucho de aluminio es de 1 mm por cuadrante. Ver Figura 50.

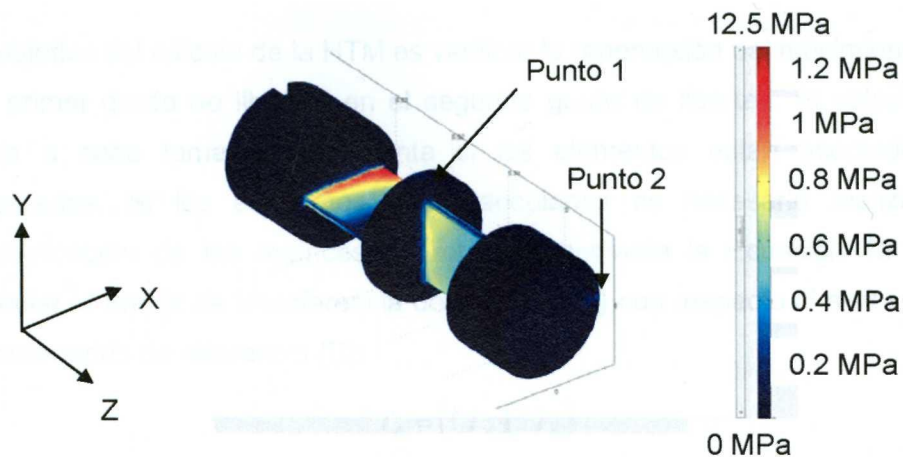


Figura 50. Análisis de esfuerzos von Mises llevado a cabo al elemento flexible en COMSOL®.

Se obtuvo un esfuerzo máximo de 10.9 MPa que no se acerca al módulo de elasticidad del nylamid. El análisis de los desplazamientos del cartucho flexible debidos a los desplazamientos inducidos se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22. Desplazamientos de los puntos 1 y 2 del cartucho flexible

Punto	Desplazamiento en mm		
	X	Z	Y
1	-2.58E-03	0.5	-0.4074
2	-1	1.84	-0.385

De este modo se comprueba el rango de movimiento circular del espejo alrededor de los ejes "X" y "Y" mediante el esquemático mostrado en la siguiente Figura 51:

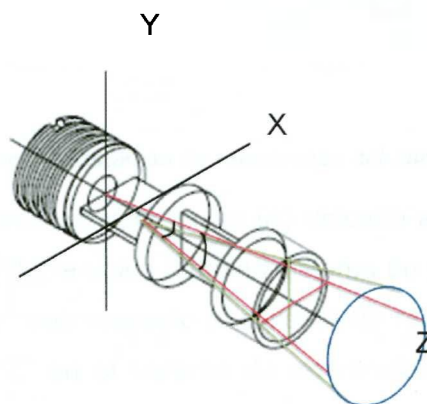


Figura 51. Rango de movimiento del espejo.

3.8 Cálculo de la matriz homogénea de transformación

El objetivo del cálculo de la HTM es verificar la repercusión del movimiento de un primer grado de libertad en el segundo grado de libertad. El cálculo se lleva a cabo tomando en cuenta si los elementos están acoplados o separados. Si los elementos están acoplados es necesario realizar la multiplicación de las matrices de rotación mediante la Ecuación 12 para calcular la matriz de transferencia del sistema {B} con respecto al sistema de coordenadas de referencia {R}:

$${}^R T_B = ({}^R T_A) ({}^A T_B) \quad (12)$$

En el caso que los elementos se encuentren separados, la formula cambia a la Ecuación 13:

$${}^R T_B = ({}^A T_B) ({}^R T_A) \quad (13)$$

Sabiendo esto se realiza el cálculo para el sistema acoplado.

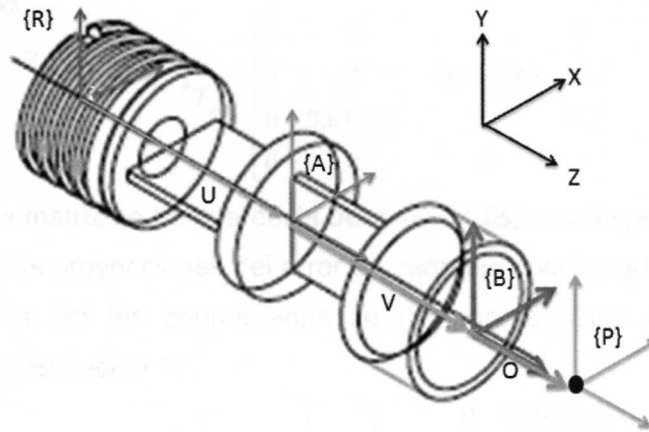


Figura 52. Sistemas de referencias del cartucho flexible.

Se identifican al sistema de referencias {A} ubicado a una distancia “U” con respecto al sistema {R}. Se ubica también sistema de referencias {B} ubicado a una distancia de “V” con respecto al sistema de referencias {A} y al punto {P} a una distancia “Z” en el sistema de referencias {B} ver Figura 52. El plano 8 del apéndice B muestra las dimensiones U y V de 15 y 20.8 mm respectivamente. Debido a que es un punto virtual se dispone al punto {P} a una distancia “O” de 10 mm con respecto al sistema de coordenadas {B}.

Se simulan desplazamientos de $+1^\circ$ equivalente a 0.01745 rad alrededor de eje "X" y "Y", estos se representan como se muestra en la Figura 53.

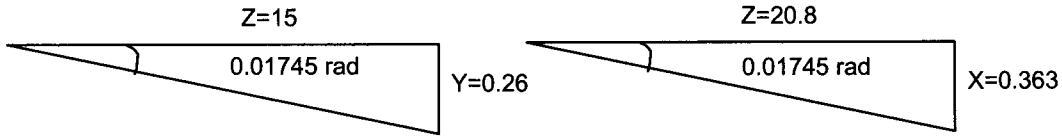


Figura 53. Representación de los desplazamientos inducidos para el análisis FEA.

Se realiza una matriz de transferencia del sistema {A} con respecto al sistema {R} mediante las proyecciones del error calculado en cada eje coordenado Ecuación 14 y se multiplica por las coordenadas con respecto al sistema de referencias {R} Ecuación 15.

$${}^R T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -0.01745 \\ 0 & 0.01745 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^R T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.01745 & 0 \\ 0 & 0.01745 & 1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Se realiza una matriz de transferencia del sistema {B} con respecto al sistema {A} mediante las proyecciones del error en cada eje coordenado Ecuación 16 y se multiplica por las coordenadas de {B} con respecto al sistema de referencias {A} Ecuación 17.

$${}^R T_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01745 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.01745 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^R T_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01745 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.01745 & 0 & 1 & 20.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

A continuación se realiza una matriz de transferencia del sistema {B} con respecto al sistema {R} mediante la fórmula: ${}^R T_B = ({}^R T_A) ({}^A T_B)$ Ecuación 18

$${}^R T_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01745 & 0 \\ 0.0003 & 1 & -0.01745 & -0.36296 \\ -0.01745 & 0.01745 & 1 & 35.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Se hace el cálculo de la posición del punto {P} con respecto al sistema de referencia {R}. Multiplicando a ${}^R T_P$ por las coordenadas del punto {P} en el sistema de coordenadas {B} Ecuación 19.

$${}^R T_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01745 & 0 \\ 0.0003 & 1 & -0.01745 & -0.36296 \\ -0.01745 & 0.01745 & 1 & 47 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1745 \\ -0.53746 \\ 45.8 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Estos puntos representan las coordenadas del punto {P} con respecto al sistema de referencias {R}, tomando en cuenta la proyección del primer grado de libertad en el segundo. De esta manera, es posible calcular la repercusión del movimiento de un primer grado de libertad con respecto a un segundo grado. En este caso los resultados de "X" y "Y" mostrados como incógnitas en la Figura 56 son 0.1745 mm y -0.5374 mm respectivamente, comparando con los desplazamientos ideales. Ver tabla 23.

Tabla 23. Desplazamientos ideales y desplazamientos reales del cartucho flexible

	Desplazamiento ideal [mm]	Desplazamiento real [mm]	Error [mm]
X	0.26	0.1745	0.0855
Y	0.363	0.5374	0.1744

3.9 Diseño final del sensor de posición

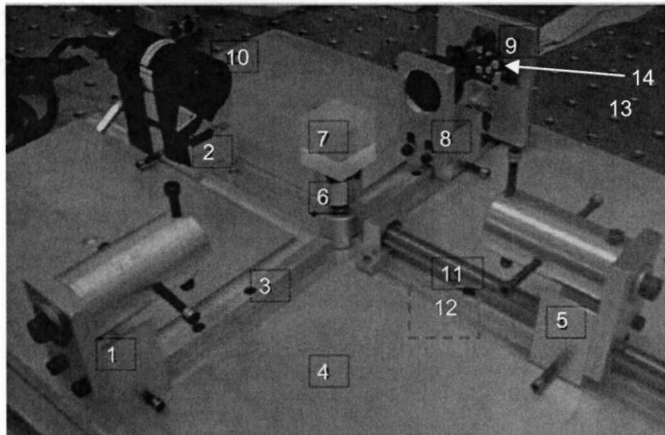


Figura 54. Prototipo del sensor de posición basado en interferometría láser.

Los elementos del prototipo físico son:

1. Soporte del porta espejo flexible
2. Soporte del láser
3. Guías
4. Base general del interferómetro
5. Dispositivo móvil porta espejo flexible
6. Soporte del separador del haz de luz
7. Separador del haz de luz
8. Soporte del lente objetivo
9. Soporte del lector de franjas de interferencia
10. Láser
11. Tornillo
12. Chumacera
13. Arreglo de fototransistores
14. Mesa neumática

3.10 Pruebas al sensor de posición

Para realizar las pruebas, se realizó el montaje del sensor LVDT en contacto con la base vertical del porta espejo flexible. El LVDT da la medición de desplazamiento con una resolución de $0.5 \mu\text{m}$ y el patrón de interferencia es medido por medio del arreglo de fototransistores. El arreglo de

fototransistores transmite las señales a un osciloscopio, que genera los pulsos que se pueden contar para transformar a una medición lineal del orden nanométrico y comparar con la medición del LVDT.

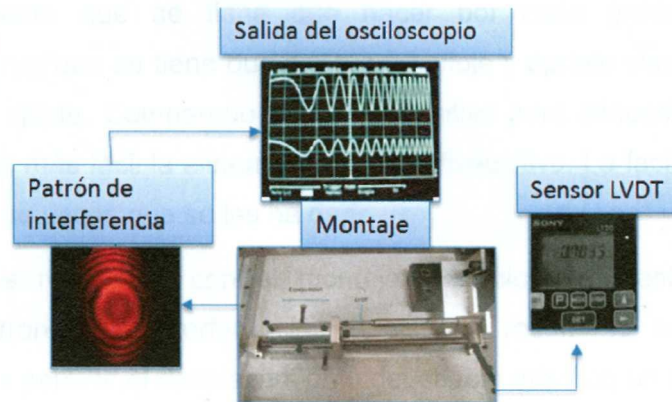


Figura 55. Montaje para prueba.

3.11 Resultados

El espejo móvil fue desplazado 10 micrómetros según el LVDT. Las señales de salida del detector fueron almacenadas. El conteo de los pulsos generados indicó un total de 36 pulsos completos ver Figura 56. Dado que cada pulso representa un desplazamiento de 317.5 nm se calcula un de 11.430 micrómetros lo que presenta una discrepancia de 1.43 micrones.

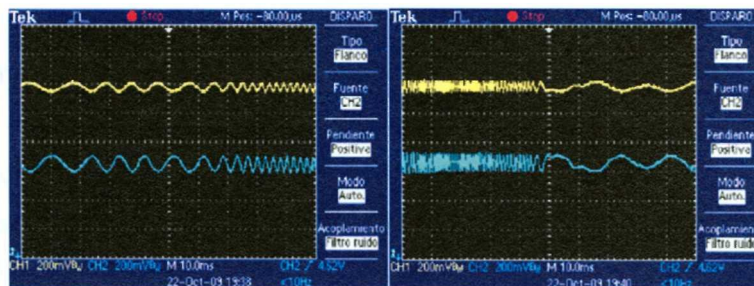


Figura 56. Señales obtenidas con montaje mecánico propuesto.

La discrepancia obtenida se debe a la poca sensibilidad de los fototransistores empleado ante la luz láser roja. El ruido producido por efectos inductivos o fuentes luminosas no controladas corrompe las señales. Otro factor a considerar son pequeñas vibraciones transitorias antes de la detención total del espejo móvil las cuales son capturadas por el sensor como desplazamientos en la dirección de movimiento.

3.12 Discusión

Es posible la alineación del haz de luz mediante los dispositivo porta flexible, mas representa una labor difícil de llevar a cabo, debido a la sincronización del movimiento que se tiene que hacer por cada grado libertad de movimiento, ya que se tiene que hacer una afloje y apriete simultaneo de los tornillos de ajuste. Comparado con el dispositivo para alineación comercial, se considera más fácil la alineación de este dispositivo. La facilidad depende del número de veces que se les ha dado uso.

Las pruebas realizadas con el montaje mecánico propuesto permitieron obtener patrones de interferencia. El sistema resultó lo suficientemente robusto para permitir el desplazamiento del espejo móvil en un rango mayor a los 5 cm sin perder el patrón de interferencia.

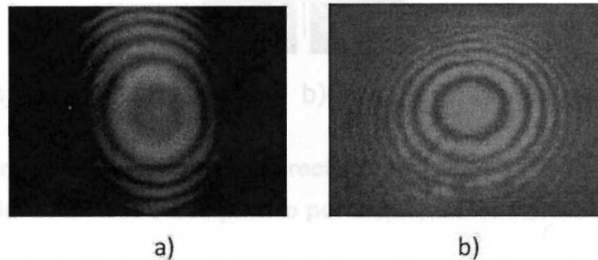


Figura 57. Comparación entre patrones de interferencia, a) Patrón obtenido con montaje propuesto y led-láser, b) Patrón obtenido con montaje comercial y láser de gas.

La Figura 57. Presenta el patrón de interferencia obtenido lográndose apreciar el contraste entre franjas y una comparación contra un patrón de franjas obtenido con el montaje compuesto por elementos mecánicos comerciales y láser de gas helio. Se observa que los dos patrones tienen una distribución circular uniforme y un gran contraste entre franjas.

El patrón de interferencia se ve afectado por la posición relativa de los diferentes elementos. Para medir desplazamientos del orden de 100 mm, los diferentes elementos deben encontrarse a una distancia de aproximadamente 50 mm del divisor, de tal manera que los foto sensores puedan identificar una señal coherente. El volumen del sensor propicia dicha medición, ya que tiene un volumen aproximado de 50 x 150 x 300 mm.

Los elementos mecánicos para construir un sensor de las características propuestas tienen un precio del orden de \$300 USD. Esto se considera de bajo costo con respecto a un arreglo compuesto por elementos comerciales, ver Figura 58.

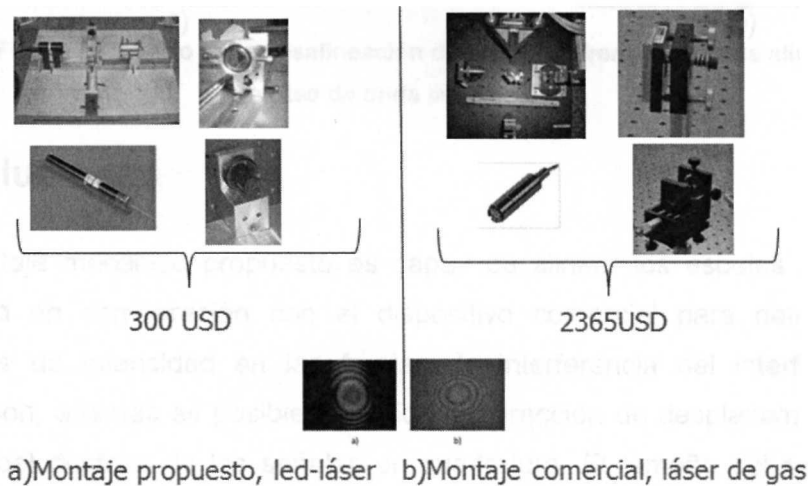


Figura 58. Comparación del precio de (a) Interferómetro realizado y (b) Interferómetro compuesto por elementos comerciales.

El efecto en la desalineación de las guías se aprecia en la Figura 59. Para mantener el patrón de interferencia proyectado consistentemente en un solo punto las guías de desplazamiento del espejo móvil deben de ser de alta precisión. Si no se consigue mantener el patrón consistentemente proyectado en una sola región el sistema de detección propuesto no podrá ser empleado. Los dos frentes de onda producidos en el cubo divisor deben permanecer alineados a fin de conseguir el patrón de interferencia.

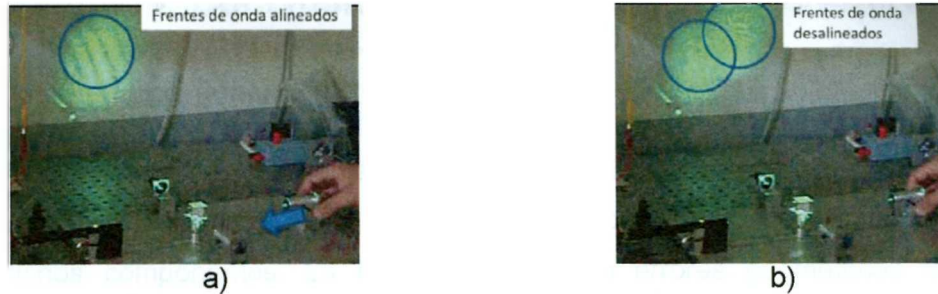


Figura 59. Efecto de la desalineación de guías: a) Frentes de onda alineados b) Frentes de onda desalineados.

Conclusiones

El montaje mecánico propuesto es capaz de alinear los espejos con más facilidad en comparación con el dispositivo comercial para detectar los cambios de intensidad en las franjas de interferencia del interferómetro Michelson, además es posible identificar la dirección de desplazamiento por medio del desfase de las señales en cuadratura. El tamaño del sensor de posición diseñado permitió visualizar correctamente el espectro de interferometría. La fabricación de los componentes mecánicos del sensor de posición se considera de bajo costo en comparación con interferómetros de otras aplicaciones.

El porta espejo es el elemento de alineación primordial en el sistema. El movimiento de un grado de libertad repercute en menor medida en el otro grado. Se presenta desalineación debido a la transmisión de movimiento lineal a través del tornillo.

Capítulo IV. Conclusiones generales y trabajo futuro

4.1 Conclusiones generales

La fabricación de componentes para micro manufactura requiere de la aplicación de tolerancias en puntos clave vitales para realizar las funciones de dichos componentes. La repercusión de los errores geométricos se propaga a través del ensamble de los elementos de cada sistema. La transmisión del movimiento representa un contraste entre efectividad de la transmisión y resolución de los sistemas, es posible apreciar esto en el sistema de poleas y banda del posicionador, ya que se gana en par y resolución, pero por otra parte se tiene un juego atribuible dicho sistema de transmisión.

La tuerca flexible reduce considerablemente el juego durante la transmisión de movimiento de rotación a traslación. La sensibilidad del elemento flexible cambia conforme las dimensiones y forma de sus vigas de unión.

Por otra parte, es posible alinear el haz de luz del prototipo del sensor mediante el diseño de los porta espejo. Además, es posible llevar a cabo un desplazamiento lineal sin perder el haz de interferencia, lo cual muestra que elementos fabricados bajo el concepto de bajo costo, tienen la capacidad de realizar la misma función que los componentes que se encuentran en el mercado.

4.2 Trabajo futuro

Posicionador

El posicionador presenta áreas de oportunidad en el diseño, ya que el desplazador queda sobre restringido por las bases superior e inferior que sostienen a los rodamientos. Es posible realizar pruebas con una base libre, en este caso la inferior, para verificar tanto la repetibilidad, juego, resolución y error de reversa máximo del posicionador.

Otra área de oportunidad son las imperfecciones geométricas de las partes y elementos que conforman al posicionador, una correcta aplicación de

tolerancias geométricas y dimensionamientos adecuados proporcionarían una mejor capacidad de posicionamiento.

Otra área de oportunidad es la transmisión del movimiento de rotación del motor al tornillo de potencia, la banda y poleas presentan juego que se ve traducido en el sistema como un error lineal, sería posible verificar la transmisión con un sistema de engranajes.

La fabricación de una tuerca flexible más rígida, es decir, menos susceptible a deformarse por las cargas que sostiene podría reducir el juego de la tuerca flexible al no poder ser comprimida o alargada. Es importante señalar que para el caso del posicionador en vertical, la tuerca flexible debe ser introducida al tornillo sin bloqueo.

Como trabajo futuro queda el estudio del diseño de los ejes horizontales "X" y "Y" de la micro maquina basado en el diseño propuesto para el eje "Y" ver Figura 60.

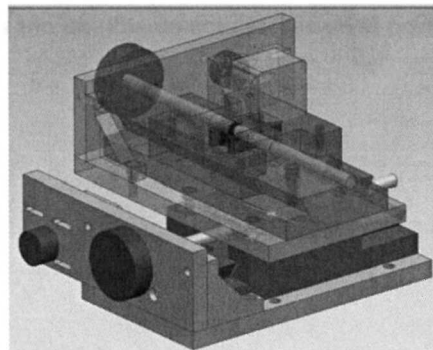


Figura 60. Diseño de los ejes "X" y "Y" de la máquina de μ EDM.

Sensor de posición

Algunos elementos del sensor presentan áreas de oportunidad refiriéndose a los errores geométricos de sus componentes, por ejemplo las guías y el soporte central del haz de luz.

Se propone el uso de un sistema de guiado para el porta espejo móvil que reduzca la desalineación e imprecisión en las guías.

El ajuste a través del apriete y afloje de dos tornillos actuadores por grado de libertad resulta una tarea complicada, ya que se presenta la pérdida de

alineación del haz de luz al trabajar sobre los dos grados de libertad del porta espejo flexible.

Para facilitar la alineación del dispositivo flexible porta espejo mediante la actuación de solo dos mecanismos se propone el mecanismo mostrado en la Figura 61, dispositivo en el cual dos armellas ensambladas a un tornillo por medio de presión y de una esfera se introducen o se extraen para mover al primer y/o segundo elemento de flexión. El casquillo exterior tiene agujeros roscados por los cuales atraviesan las roscas de los tornillos acoplados a las armellas. De esta manera se tendrían un actuador por cada grado de libertad del porta espejo flexible.

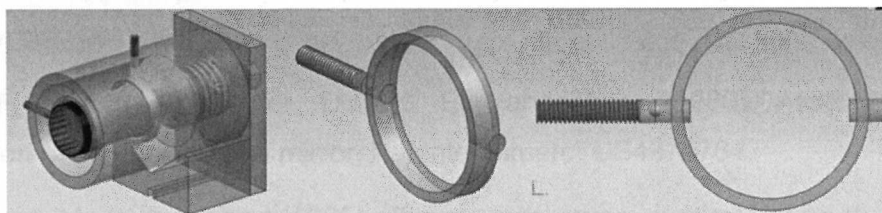


Figura 61. Rediseño posible de actuadores en el porta espejo flexible.

Referencias

Farrand Clair, Hasbrouck Harold (1959). Vertical leveling mirror. Patente numero: US2907246.

T Kobayashi, J Shudong (1982). Optical fm heterodyne interferometry for range and displacement measurements". CPEM Digest, Japan, IEEE.

Ura Shogo, Suhara Toshiaki, Nishihara Hiroshi (Febrero 1989). Integrated-Optic Interferometer Position Sensor". Journal of lightwave technology. Vol. 7, NO. 2, IEEE.

Vaught John (1989). Suspension assembly for a scanning mirror. Patente numero: US4861125.

Philip F. Marino, Rochester, Donald, E. Vandenberg (1989). Assembly for correction of distorsions of a mirror. Patente numero: US4875764.

Yau David, Modavis, Robert (1985). Thermo mechanical overlay signature tuning for Perkin- Elmer mask aligner. Patente numero: US4540251.

Klotz Paul (1991). Momentum balance mechanism for use with a scan mirror or other component. Patente numero: US5040860.

Samir Medik. (2000). High precision lineal slide. Part I: Design and construction. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40. 1039- 1050 pp.

A.C Okafor, Yalcin M. Estekin (2000). Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using body kinematics. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp. 1199-1213.

Kussul E., T. Baidyk, Caballero-Ruiz A., y G. Velasco (2002). Development of low-Cost Microequipment". International Symposium on Micromechatronics and Human Science. IEEE, pp 125-134.

Nasiri Steven, Smith James, Lambe David, Novack Mitchel (2003). Microelectromechanical mirror and mirror array. Patente numero: US6533947.

Kim, J., & Doo, J. (2003). Magnetostrictive self-moving cell linear motor. Mechatronics. Vol.13, pp 739-753.

Tien-Fu Lu, Daniel C. Handley, Yuen Kuan Yong (2004). Position of a 3 DOF Compliant Micro-Motion Stage. School of Mechanical Engineering. The University of Adelaide.

Shutov, M., Sandoz, E., Howard, D., Hsia, T., Smith, R., & Collins, S. (2005). A microfabricated electromagnetic linear asynchronous motor. *Sensors and Actuators A; Physical*. Vol.121, pp. 566-575.

Hisatome Masatoshi, Donado Carlos (2005). Sistema interferometria láser con CNC". Reporte interno SENACYT-CENAMEP Panama.

Koernel Ehmann, Jian Cao, Richard Devor, Shiv Kapoor (2006). Seminario de micromanufactura. Northwestern university Illinois.

Kussul E., T. Baidyk, A. Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz A., y G. Velasco (2006). Scaling Down of Micro equipment Parameters. *Precision Engineering* Vol.30, pp 211-222.

Flores Abiud, Horacio Ahuett, Gangbing Song (2006). Design and Experimental Characterization of Flexure activated by SMA wires for Microassembly Operations.

Malacara D. (2007). A Optical Shop Testing. pp 725-728 ISBN: 9780471484042.

Miranda Hernan, Coronel Martin, Torga Jorge (Octubre 2007): Caracterización de desplazamiento en un sistema de traslación por métodos ópticos. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, AAENDE, Argentina.

Wu, S. T., Mo, S.C. & Wu, B.S (2007). An LVDT-based-self-actuating displacement transducer *Sensors and actuators. A: Physical*. Vol.141, pp. 558-564.

Asad, A.B.M.A. Takeshi Masaki, M. Rahman, H.S. Lim, y Y.S. Wong (Octubre 2007). "Tool-based micro-machining". *Journal of Materials Processing technology* Vol. 192-193, pp 204-211.

Dinh Son Thach , Le Dinh Tuan, Nguyen Tang Vu, Nguyen Minh Chau, Tran Thanh Nam (2007). Fabrication of Michelson interferometer for phase-shifting method". Faculty of Applied Science, University of Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam.

Chaidés, Oscar Zuñiga (2008). Sistema de posicionamiento y potencia para máquina de μ EDM. Trabajo de grado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey.

Ahuett Horacio, Chaidés Oscar, Domínguez Edgar (2009). Desarrollo de sensor para interferometría láser de bajo costo” Centro de innovación en diseño y Tecnología y Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería y Arquitectura Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey.

Chaidés Oscar, Ahuett Horacio, Flores Abiud, Caballero Alberto, Ruiz Leopoldo (2009). Diseño y prueba de un sistema de control de espaciamiento y potencia para Micro EDM. Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería y Arquitectura Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. SOMIM 2010.

Ahuett Horacio, Chaidés Oscar, Domínguez Edgar (2010). Sensor de posición basado en el principio de interferometría láser” Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería y Arquitectura Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. SOMIM (2010).

Emisor <http://www.lasertex.eu/> (26 de Octubre del 2010). Commercial_Offer_LSP30-3D.W. Correo electrónico enviado a A00805879@itesm.mx

Emisor Mark Filho mark@newmarksystems.com (28 de Octubre del 2010). Re: Linear Positioners Landing Page Form. Correo electrónico enviado a A00805879@itesm.mx

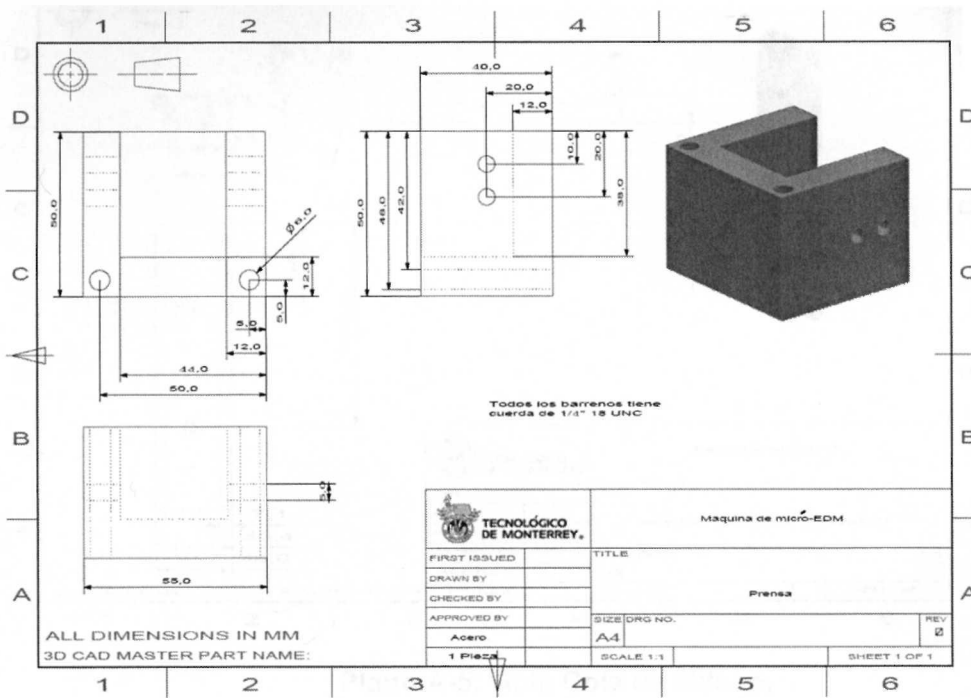
Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association (1999. 19 de Noviembre). Washington, DC: American Psychological Association. Recuperado el 4 de Noviembre del 2010 de BiSlide positioning system <http://www.bislide.com/>

Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association (1999, 19 de Noviembre). Washington, DC: American Psychological Association. Recuperado el 10 de Noviembre del 2010 de Lambda scientific <http://www.lambdasys.com/Prices.htm>

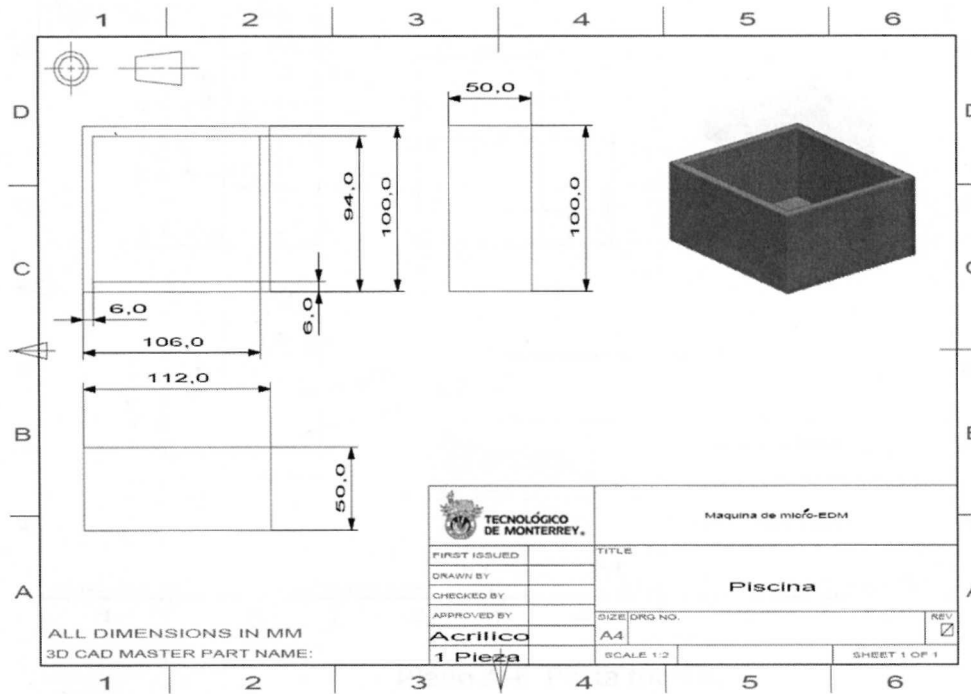
Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association (1999, 19 de Noviembre). Washington, DC: American Psychological Association. Recuperado el 10 de Noviembre del 2010 de Thorlabs www.thorlabs.com

Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association (1999, 19 de Noviembre). Washington, DC: American Psychological Association. Recuperado el 10 de Noviembre del 2010 de Armstrong optical <http://www.armstrongoptical.co.uk/4/Noncontact.html>

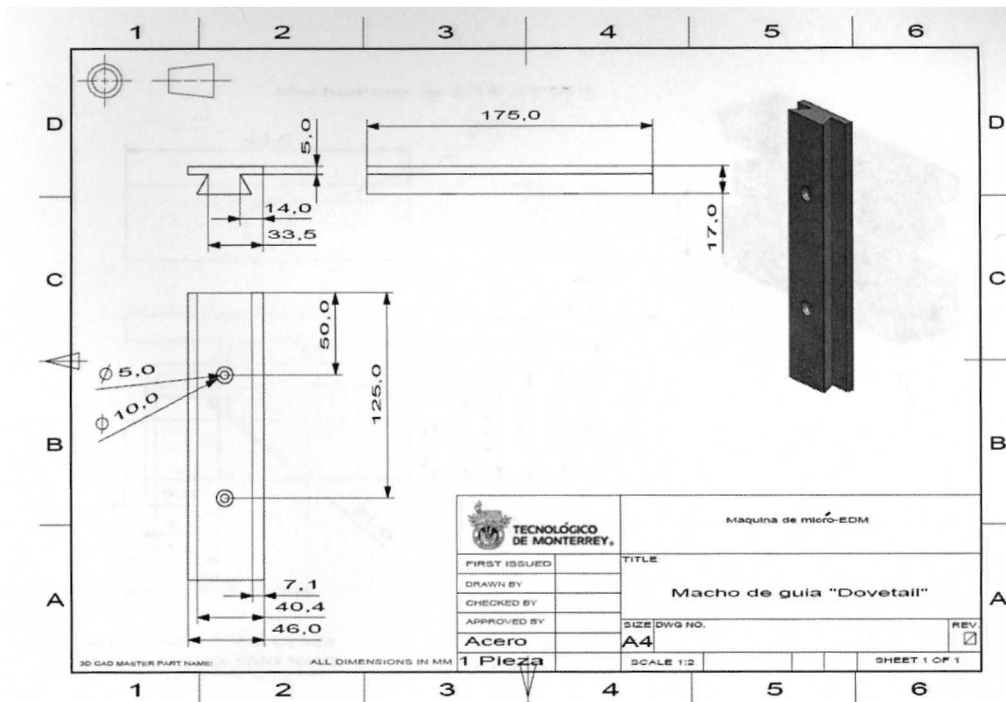
García Pedro (Diciembre 2010). Diseño, construcción y caracterización de un sistema posicionamiento de un grado de libertad usando mecanismos flexibles. Trabajo de grado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey campus Monterrey.



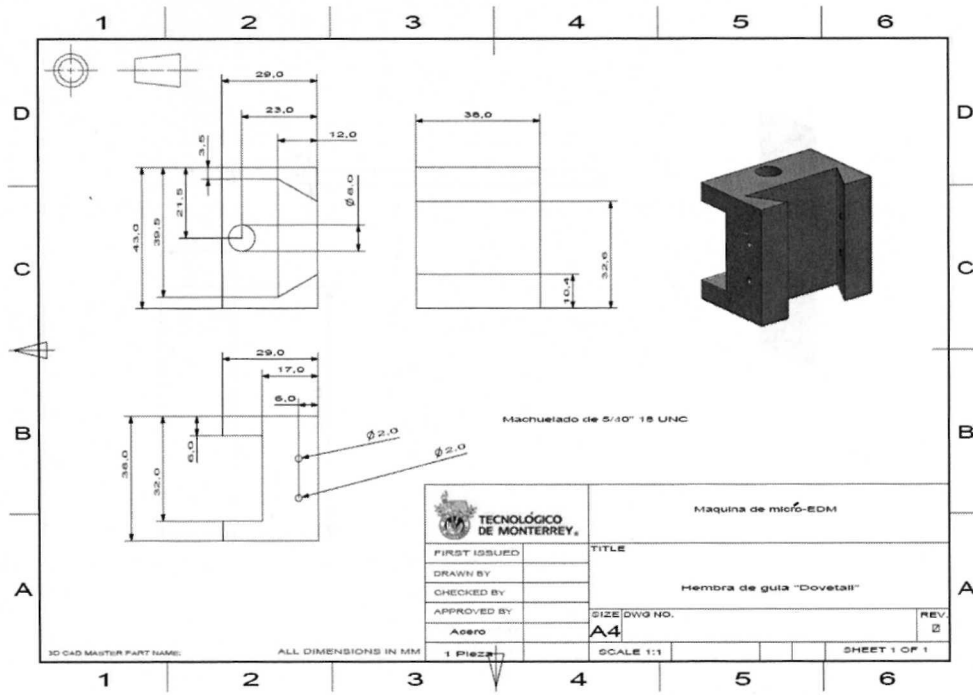
Plano A-3. Prensa.



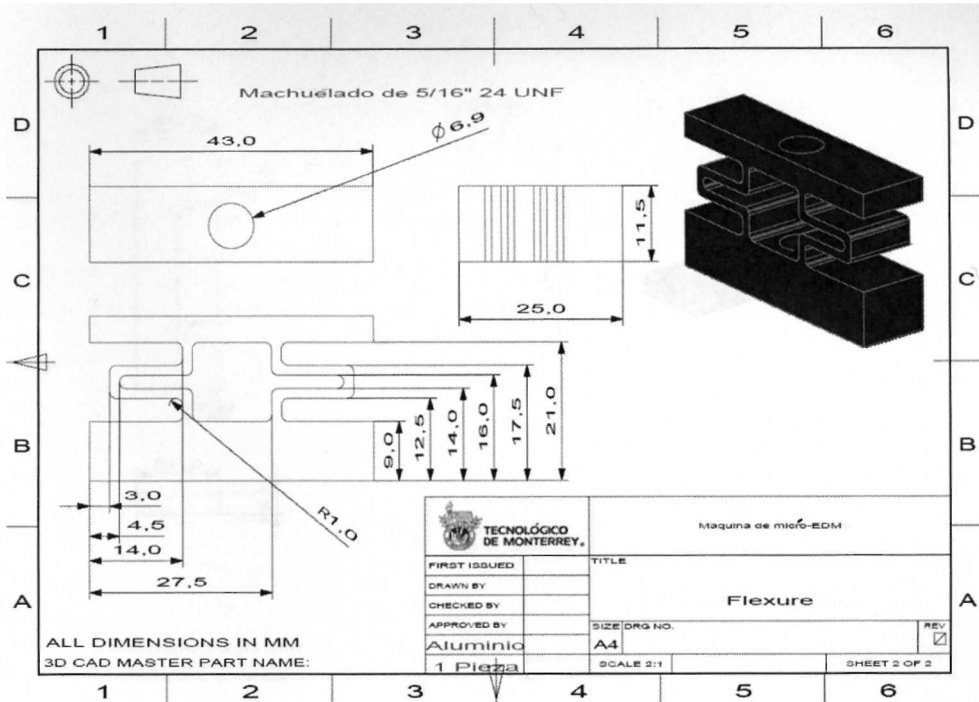
Plano A-4. Tanque.



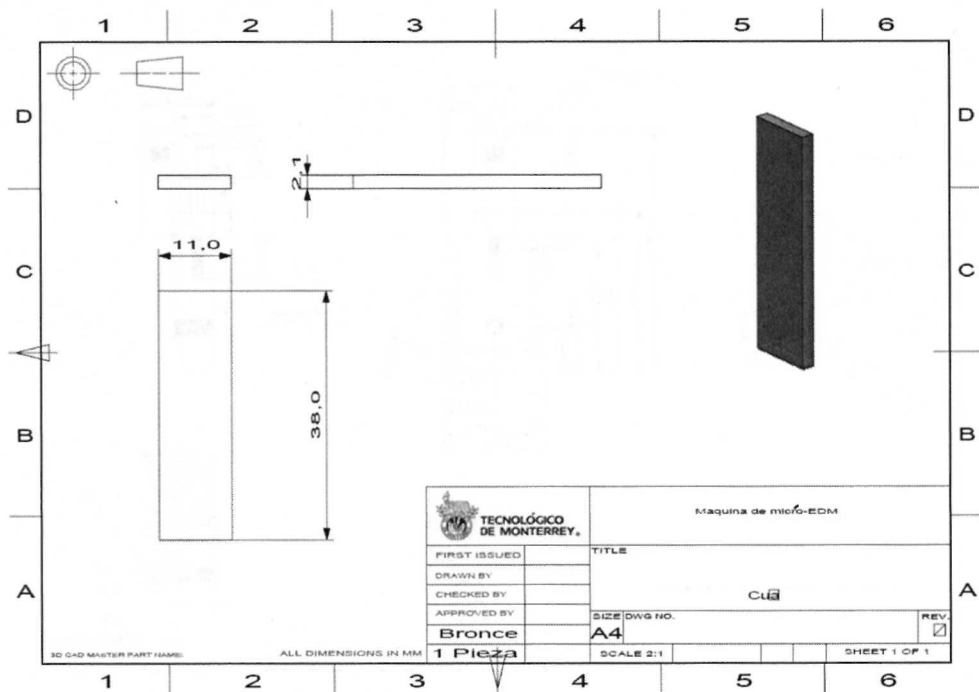
Plano A-5. Guía Cola de Milano.



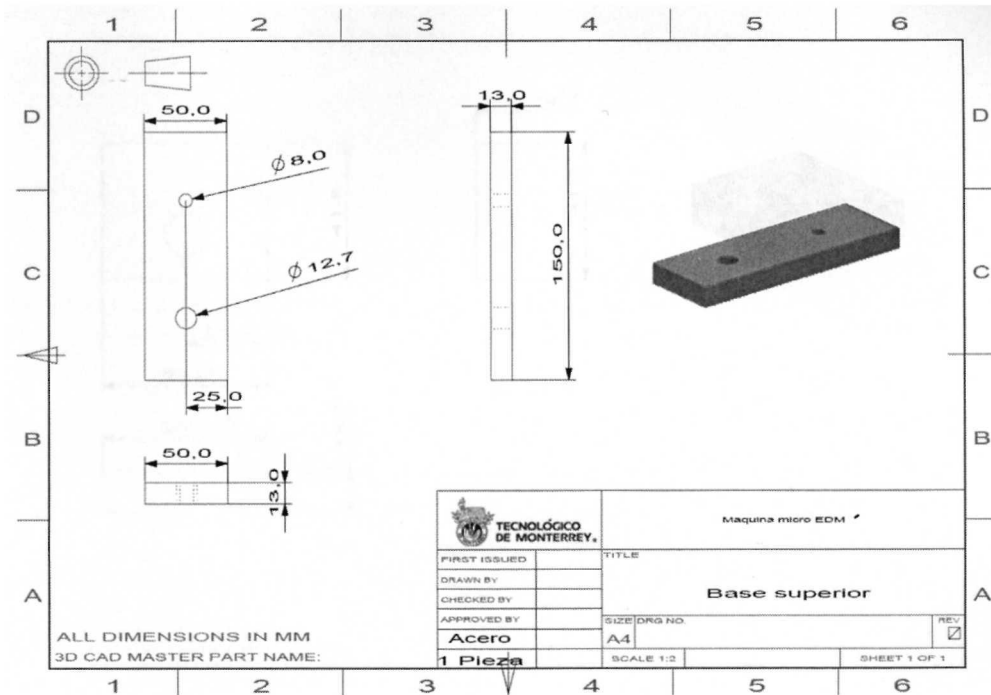
Plano A-6. Porta tuerca.



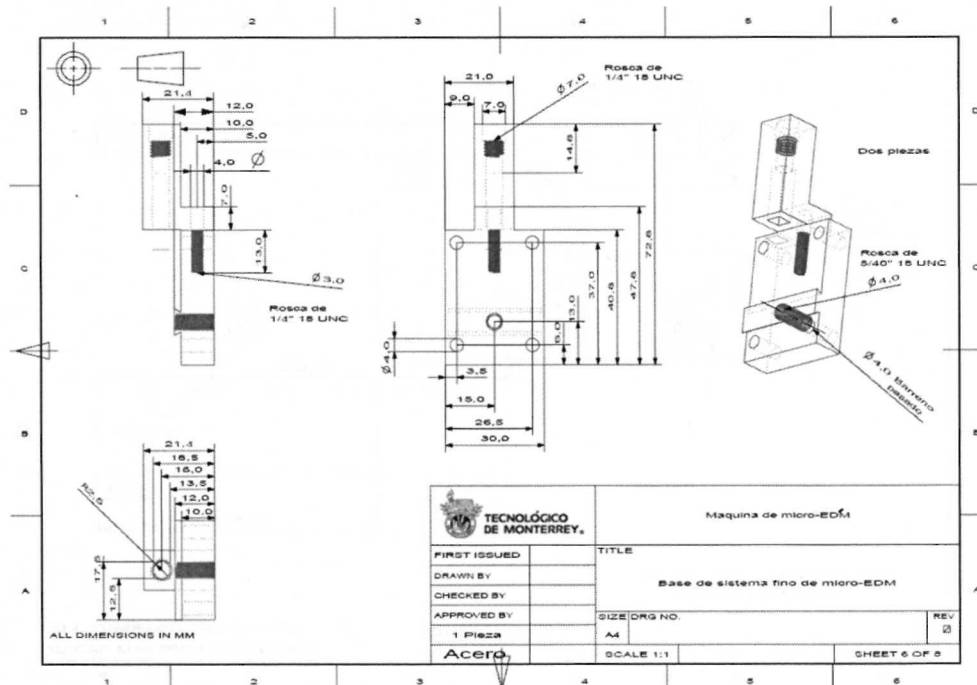
Plano A-7. Tuerca flexible de aluminio.



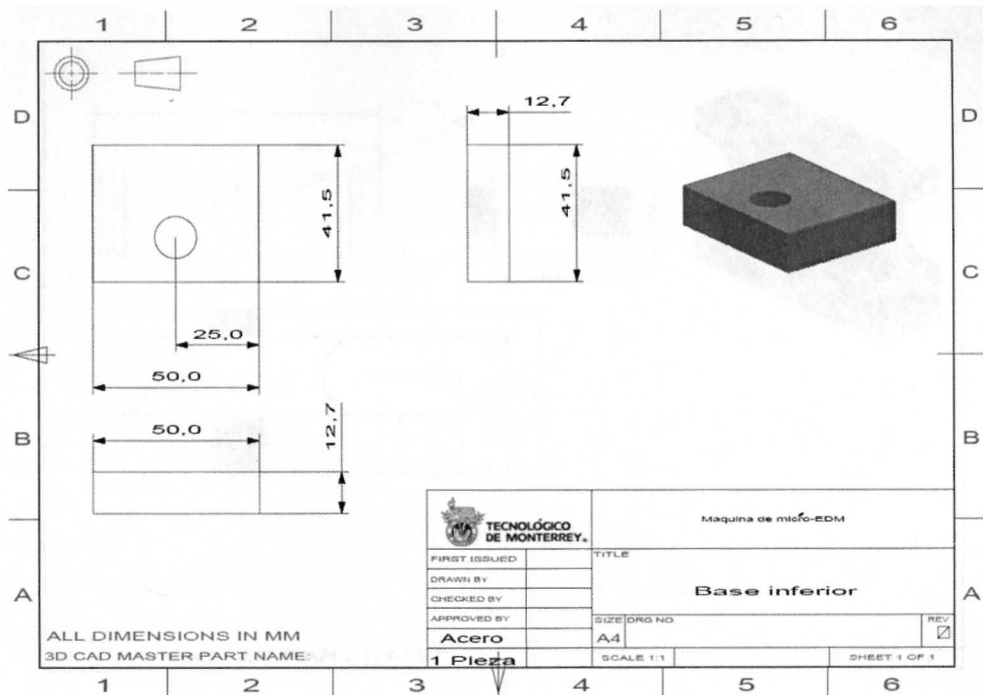
Plano A-8. Cuña.



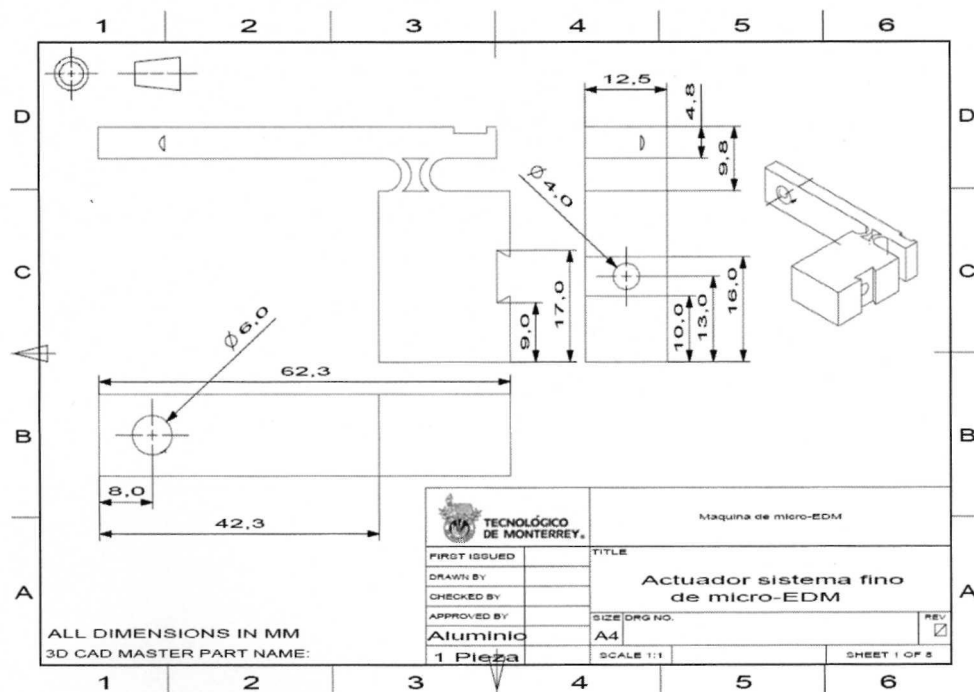
Plano A-9. Base superior.



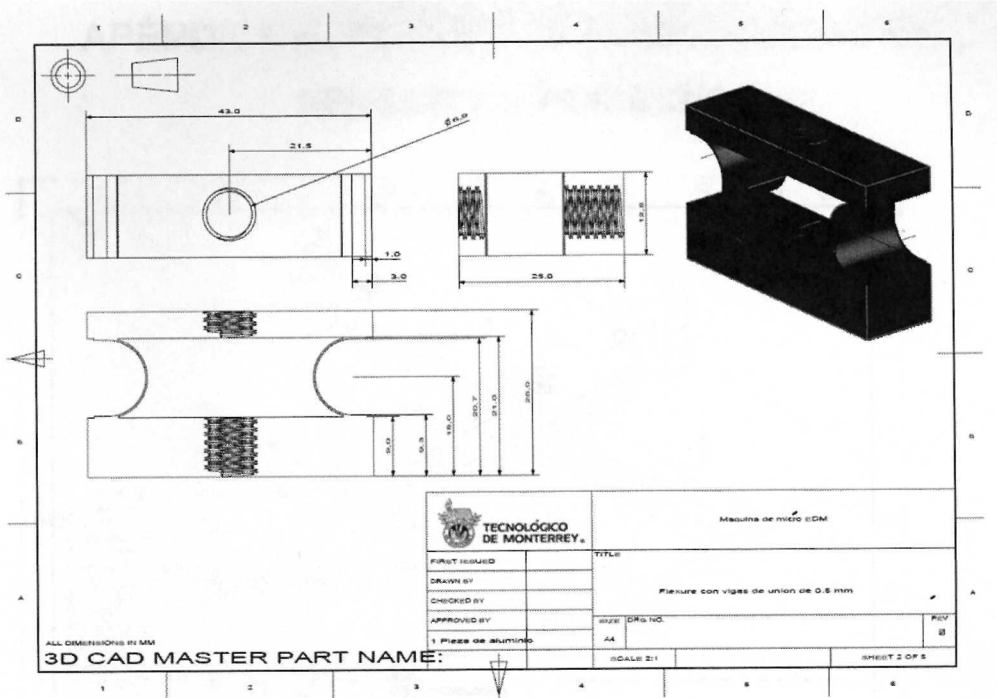
Plano A-10. Sistema fino.



Plano A-11. Base inferior.

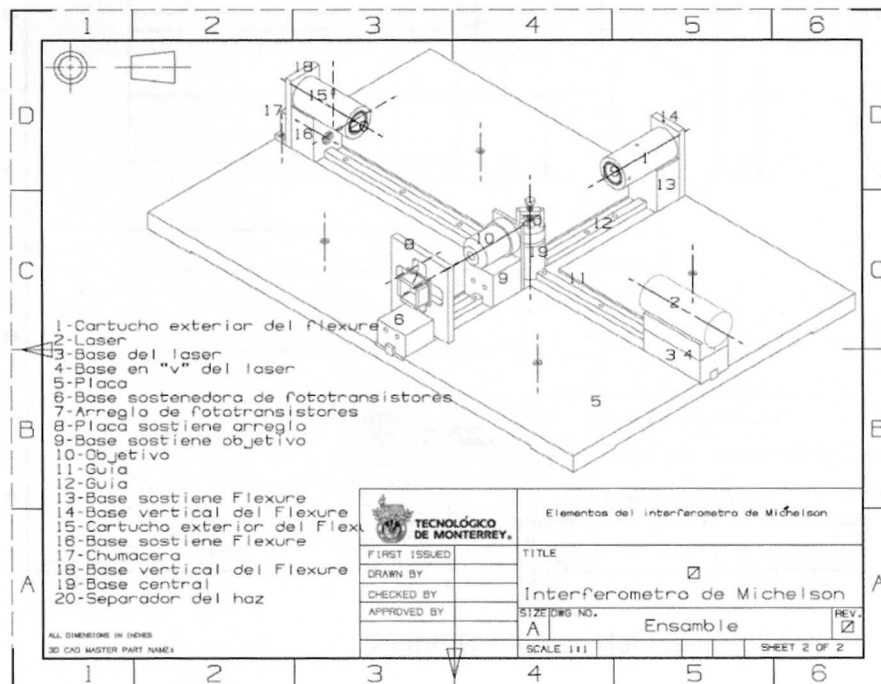


Plano A-12. Elemento flexible del sistema fino.

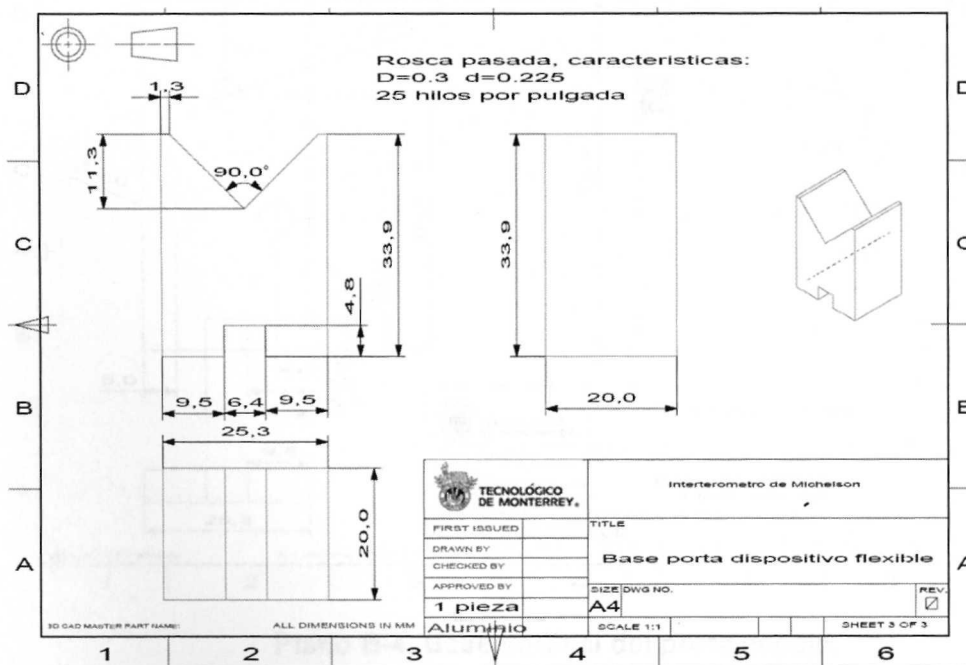


Plano A-13. Tuerca flexible con inserto de bronce.

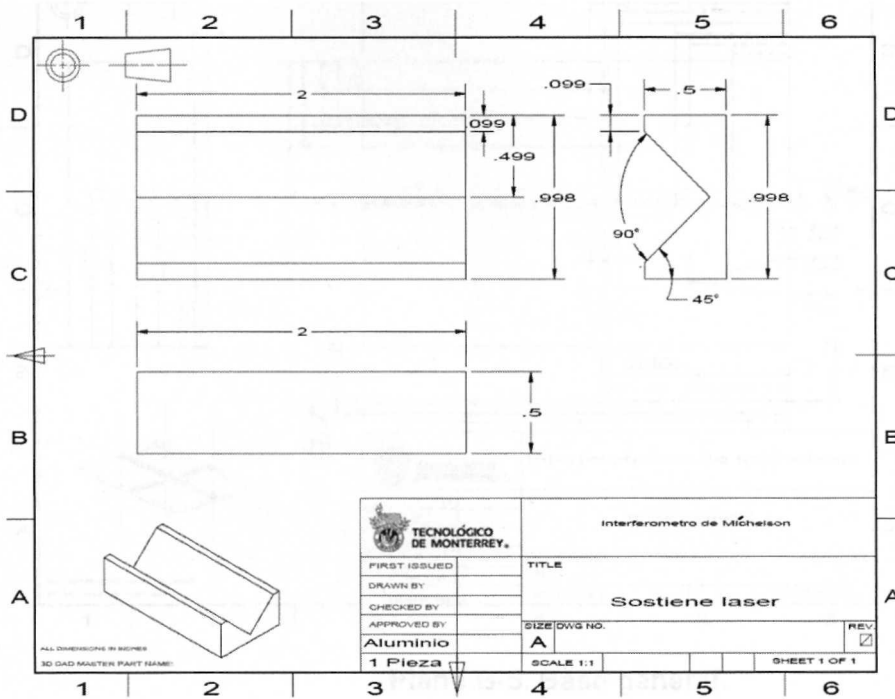
APÉNDICE B- PLANOS DE FABRICACIÓN DEL SENSOR DE POSICIÓN



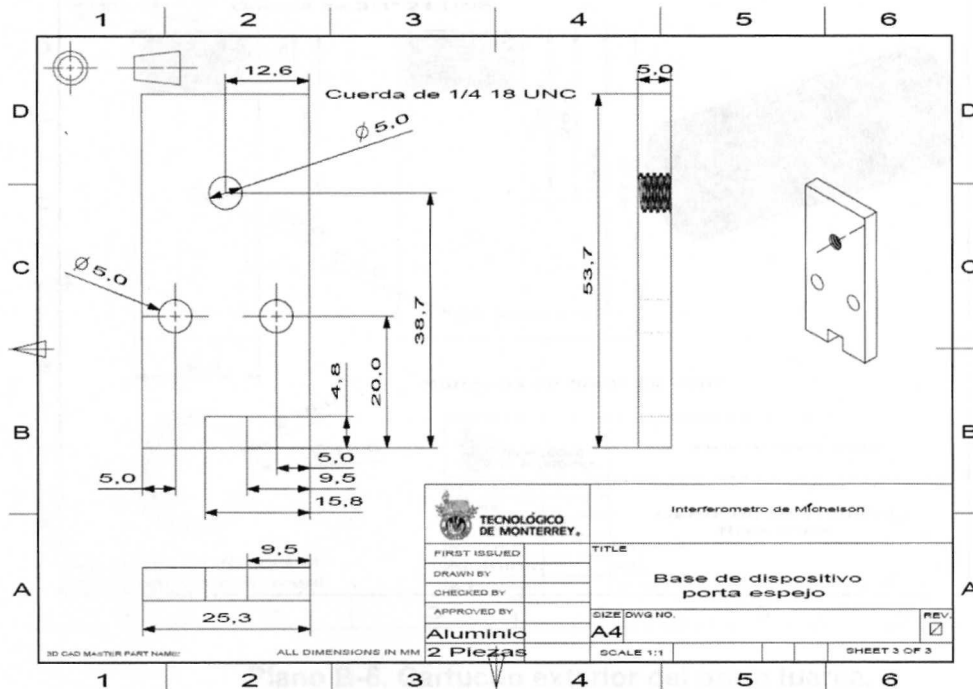
Plano B-1. Ensamble del sensor de posición.



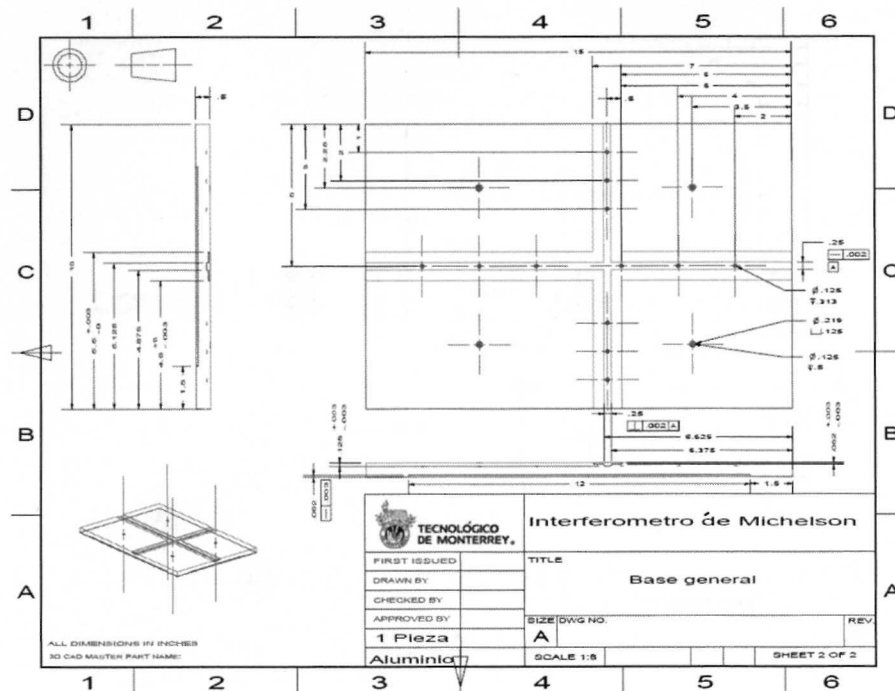
Plano B-2. Base del porta espejo.



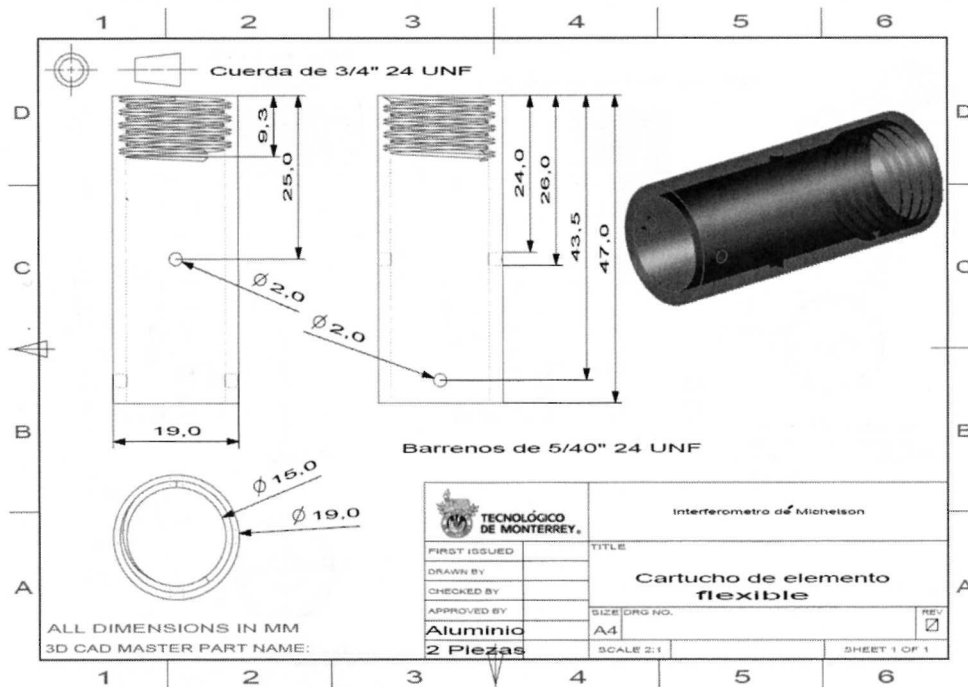
Plano B-3. Base del láser.



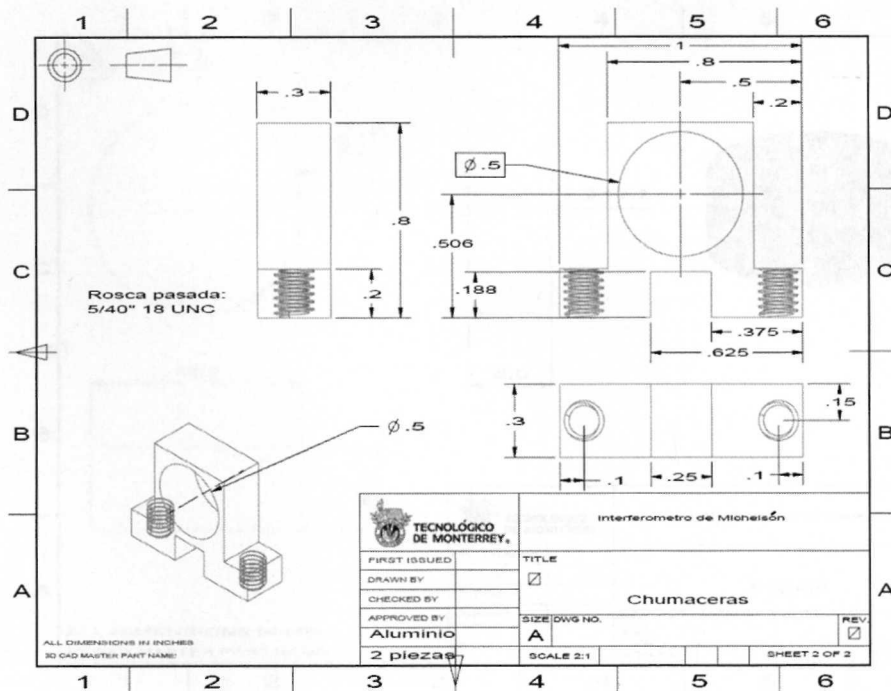
Plano B-4. Base vertical del porta espejo.



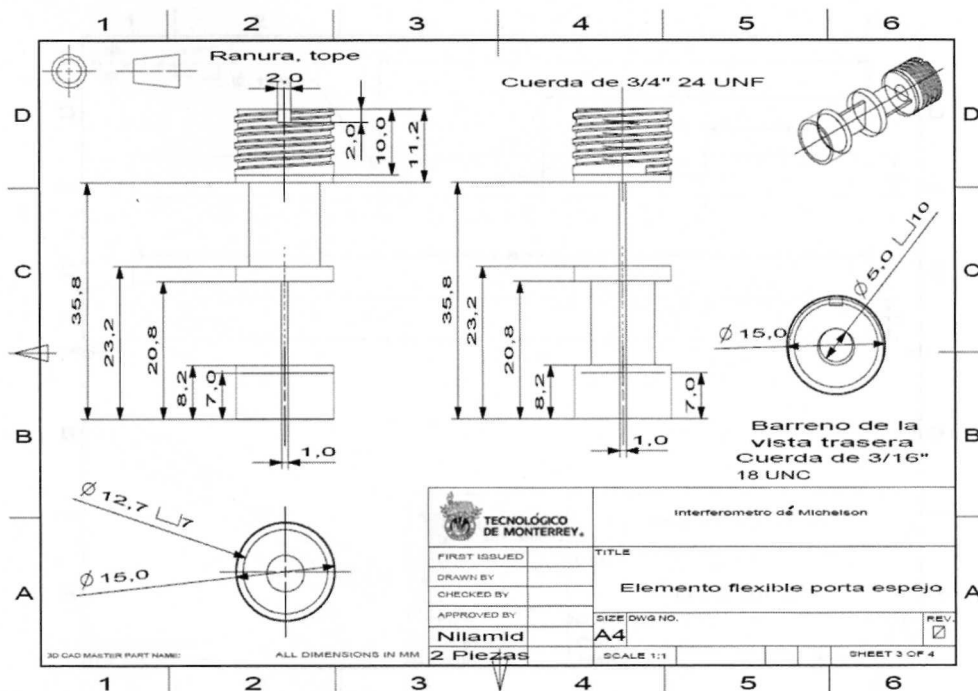
Plano B-5. Base general.



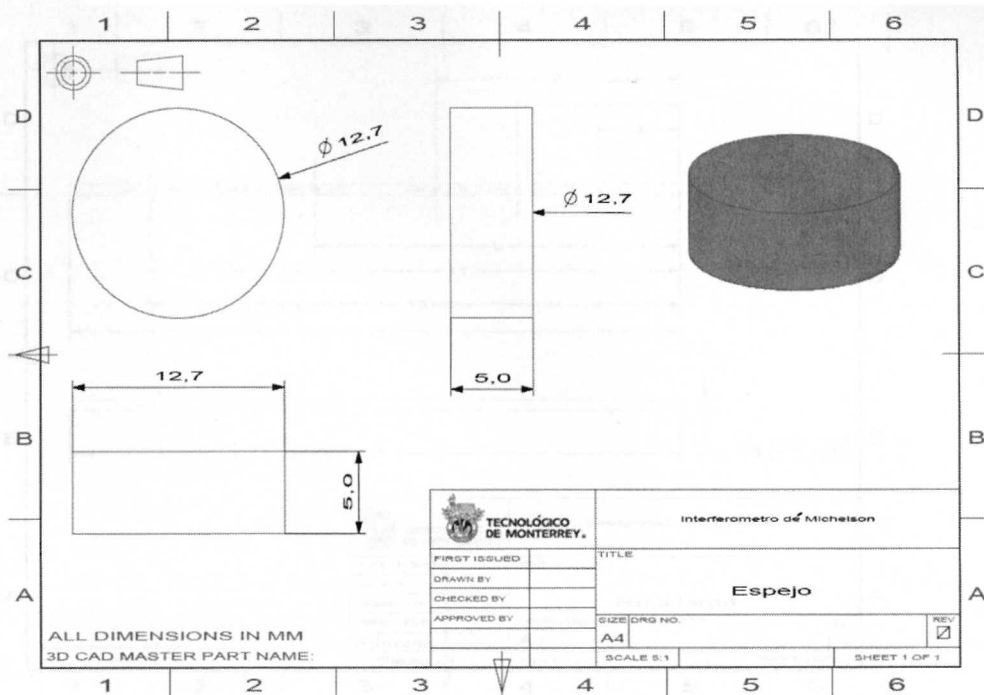
Plano B-6. Cartucho exterior del porta tuerca.



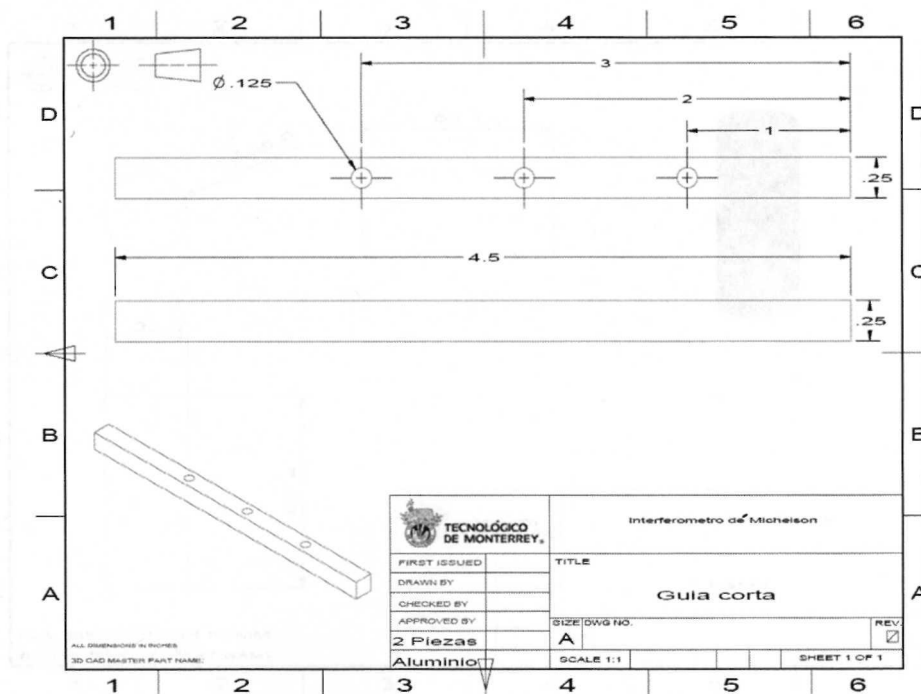
Plano B-7. Chumaceras.



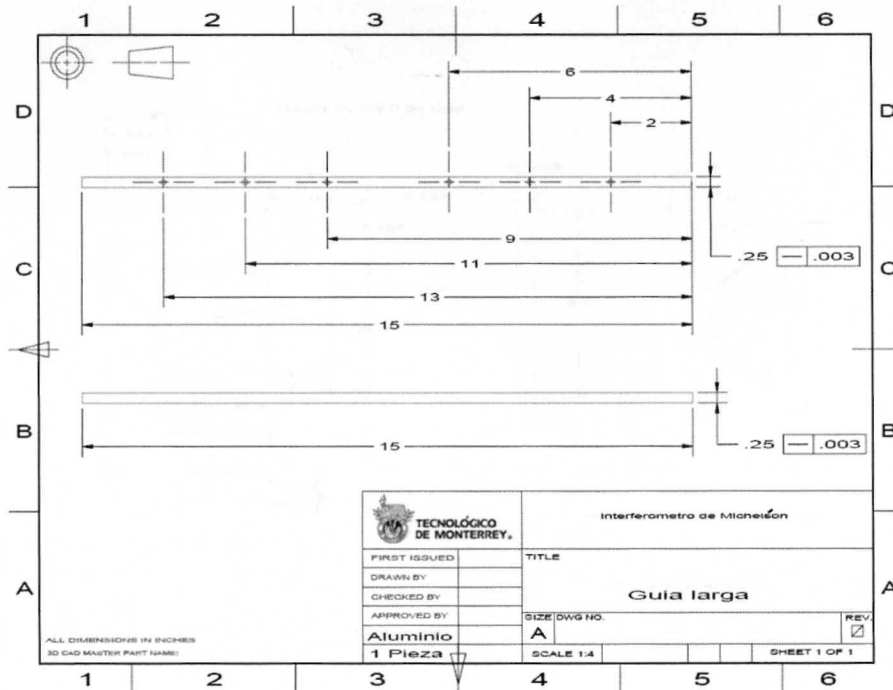
Plano B-8. Cartucho flexible.



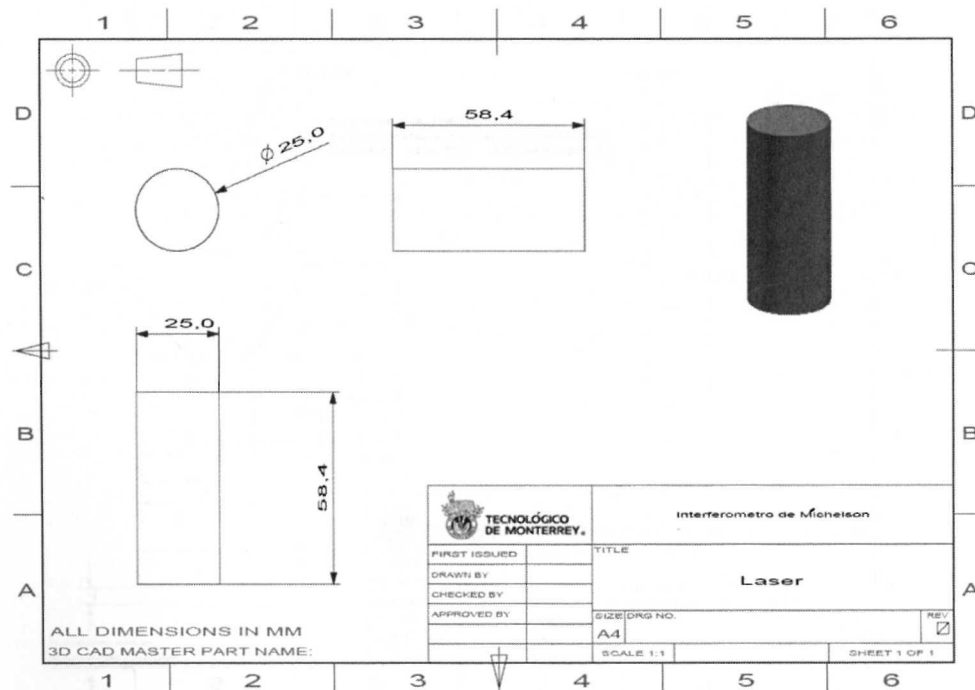
Plano B-9. Espejo.



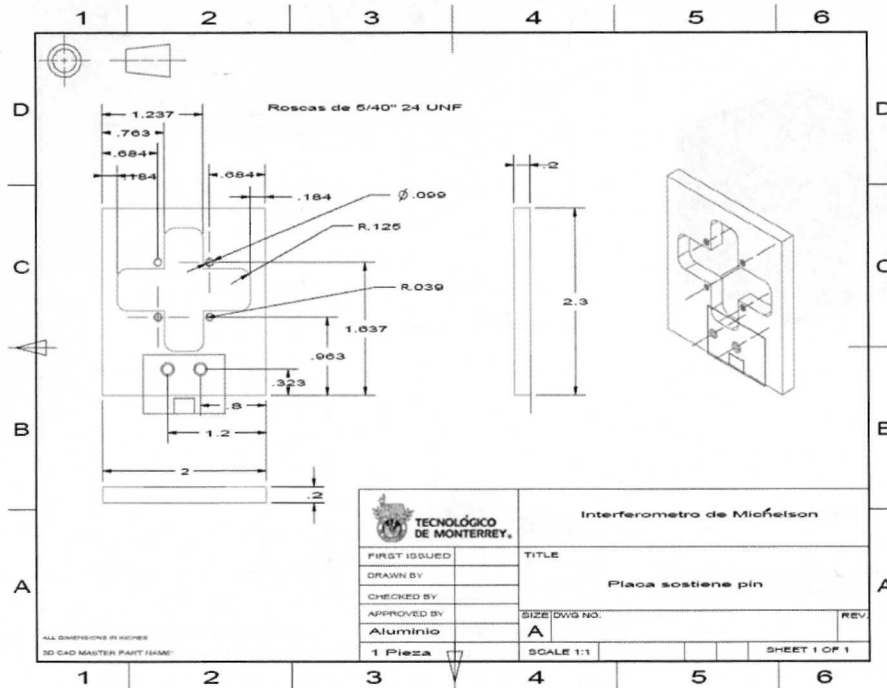
Plano B-10. Guía corta.



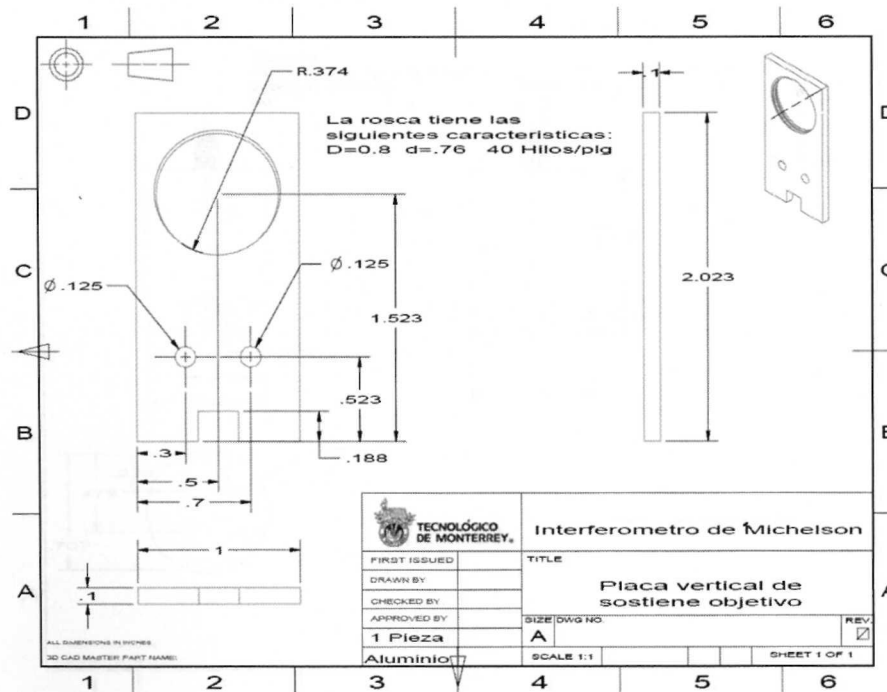
Plano B-11. Guía larga del porta espejo



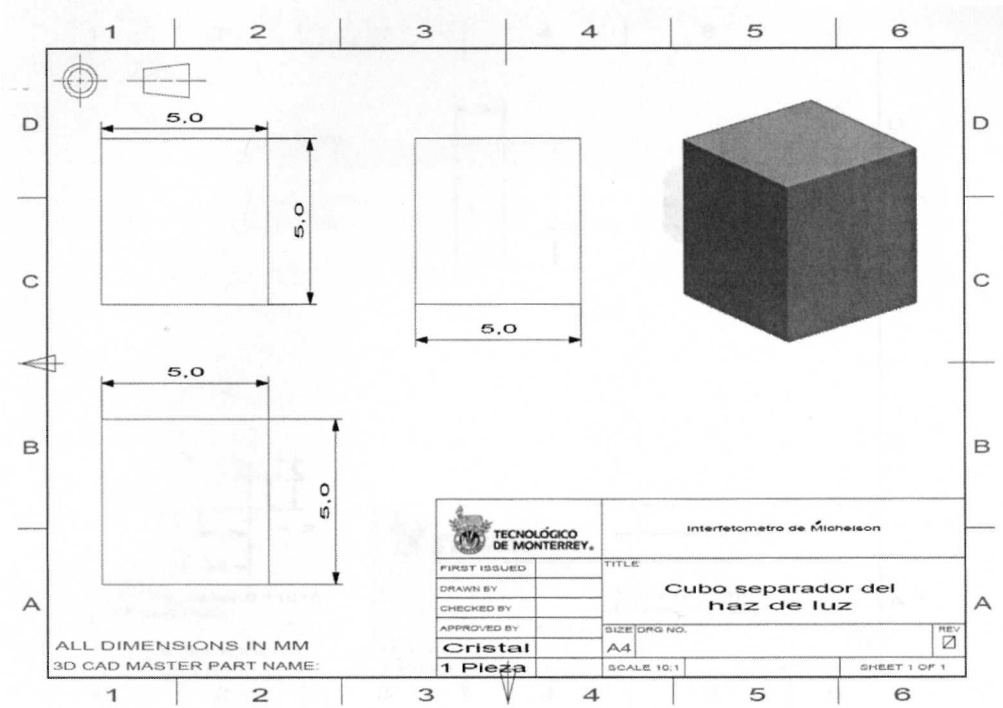
Plano B-12. Láser



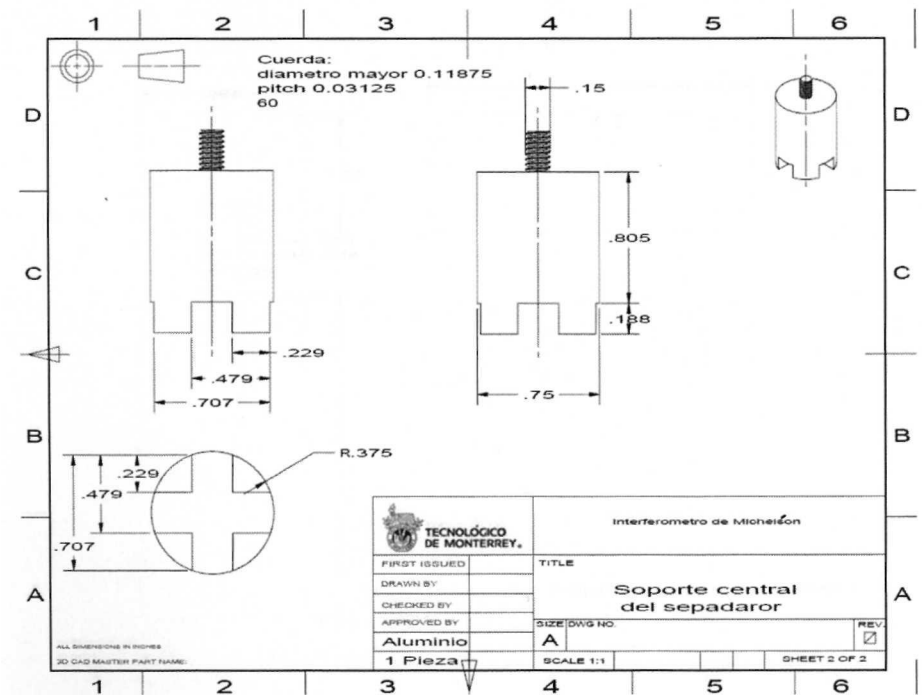
Plano B-13. Porta arreglo del fotosensor.



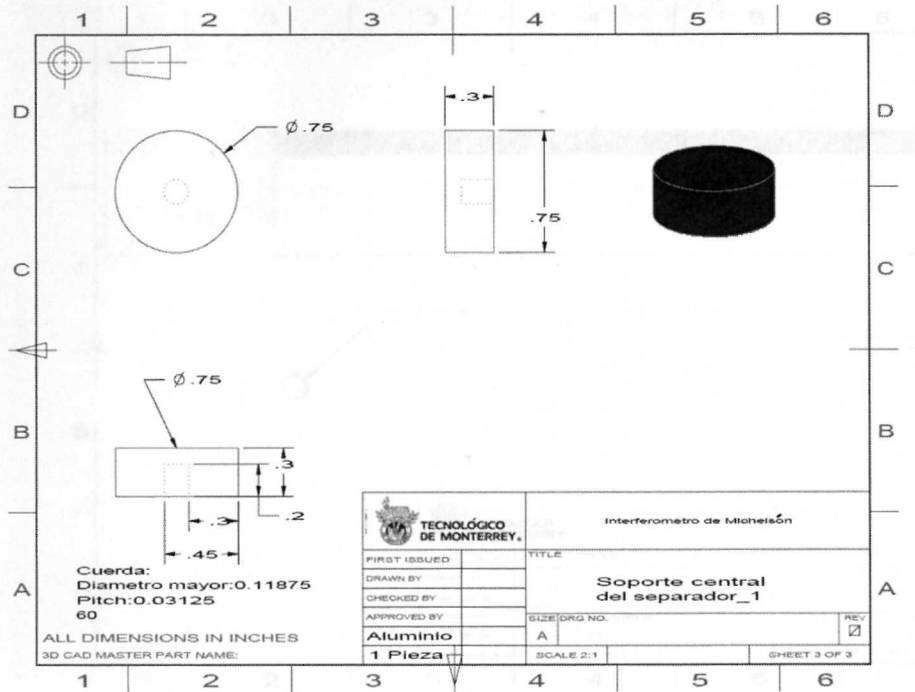
Plano B-14. Porta objetivo.



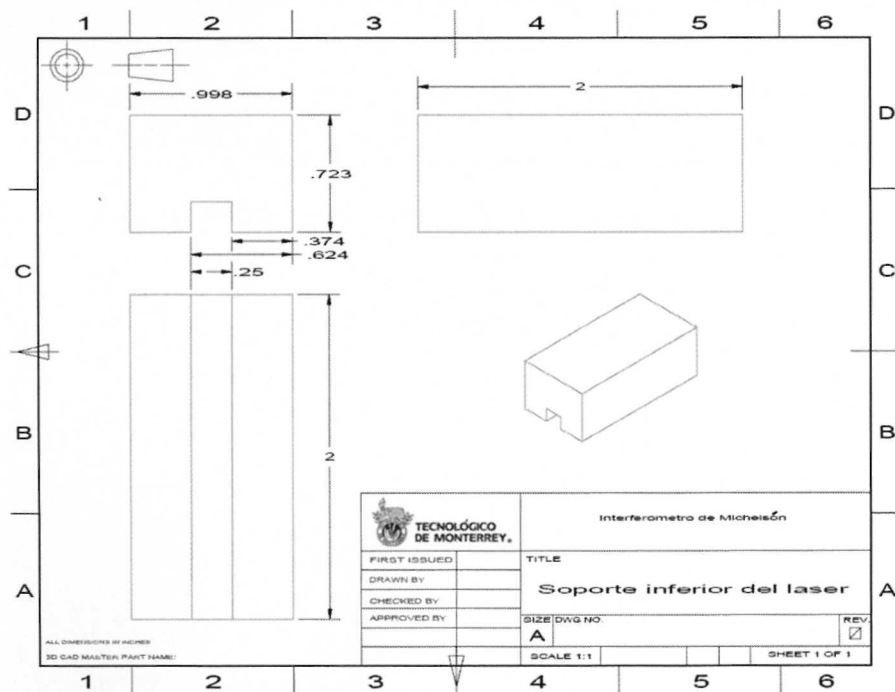
Plano B-15. Separador del haz de luz



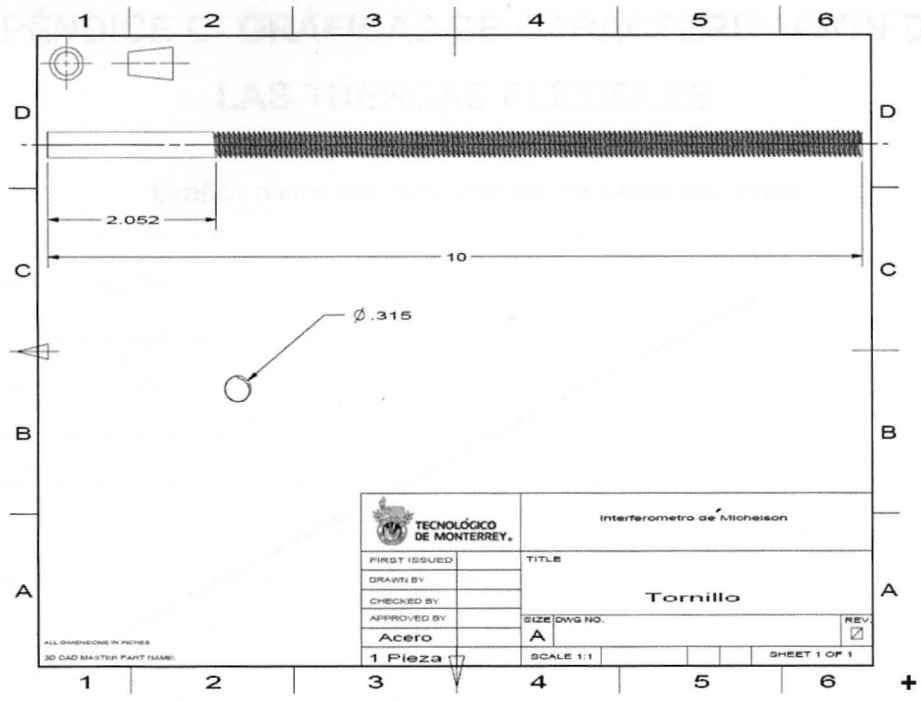
Plano B-16. Porta separador tornillo.



Plano B-17. Porta separador tuerca.



Plano B-18. Base porta láser.



Plano B-19. Tornillo.

APÉNDICE C- GRÁFICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS TUERCAS FLEXIBLES

Gráfica pasos del "encoder contra pasos del motor

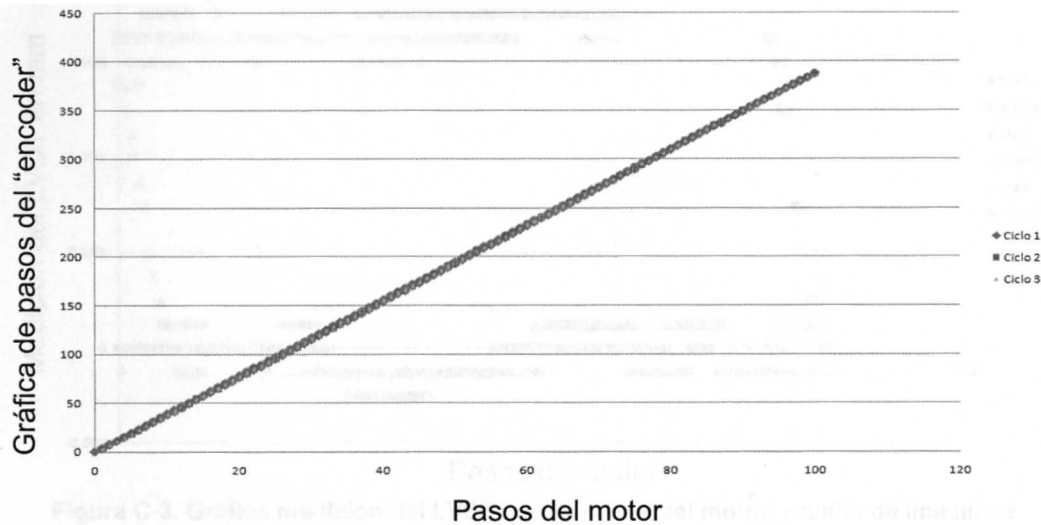


Figura C-1. Gráfica pasos del "encoder contra pasos del motor, prueba [T1, P1, S]

Gráfica de medición del LVDT contra pasos del motor

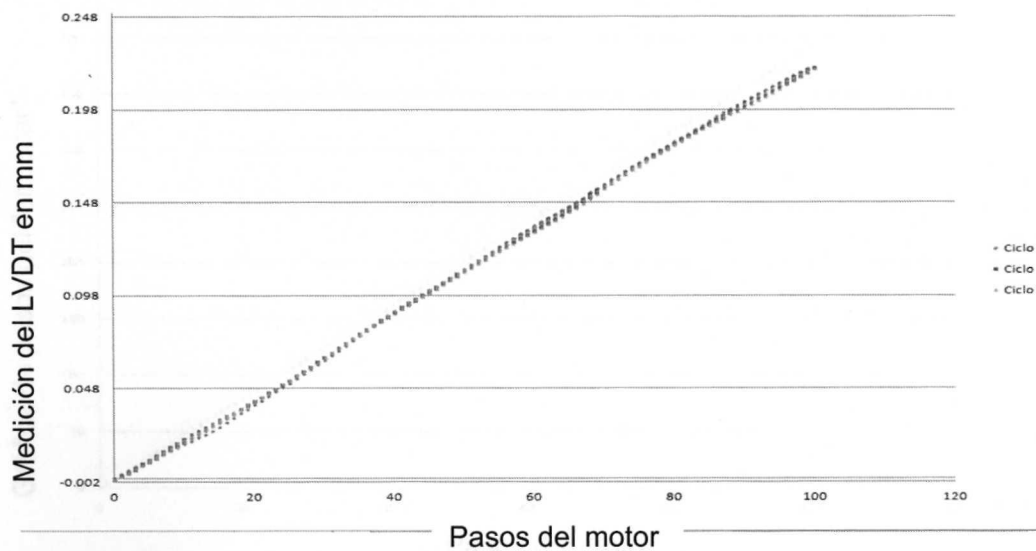


Figura C-2. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor, prueba [T1, P2, S]

Gráfica de medición del LVDT en mm contra pasos del motor

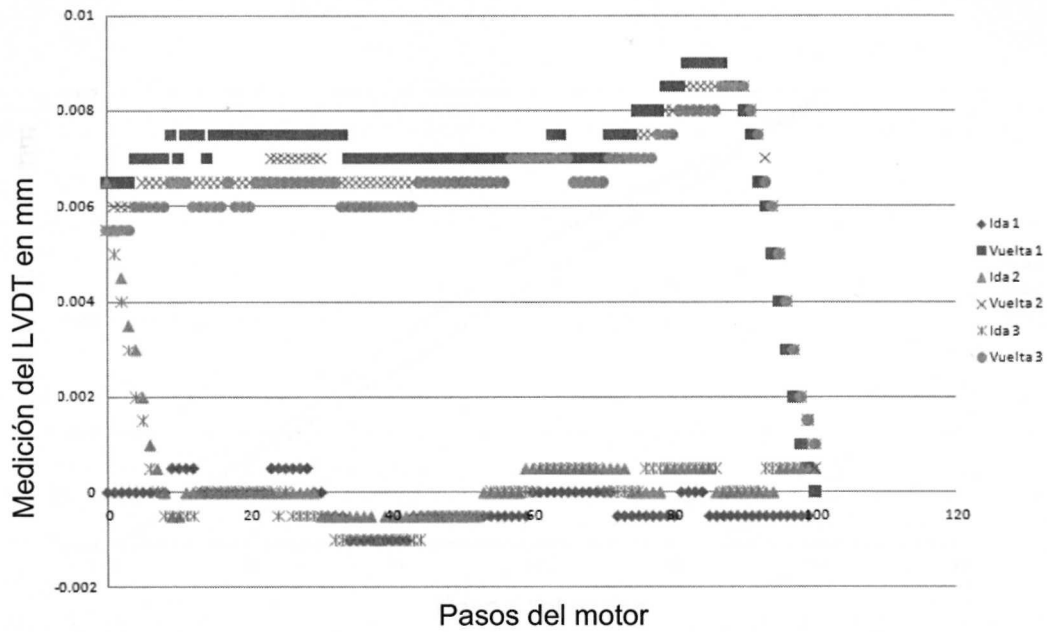


Figura C-3. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor, prueba de linealidad

Gráfica de pasos en el "encoder" contra pasos del motor

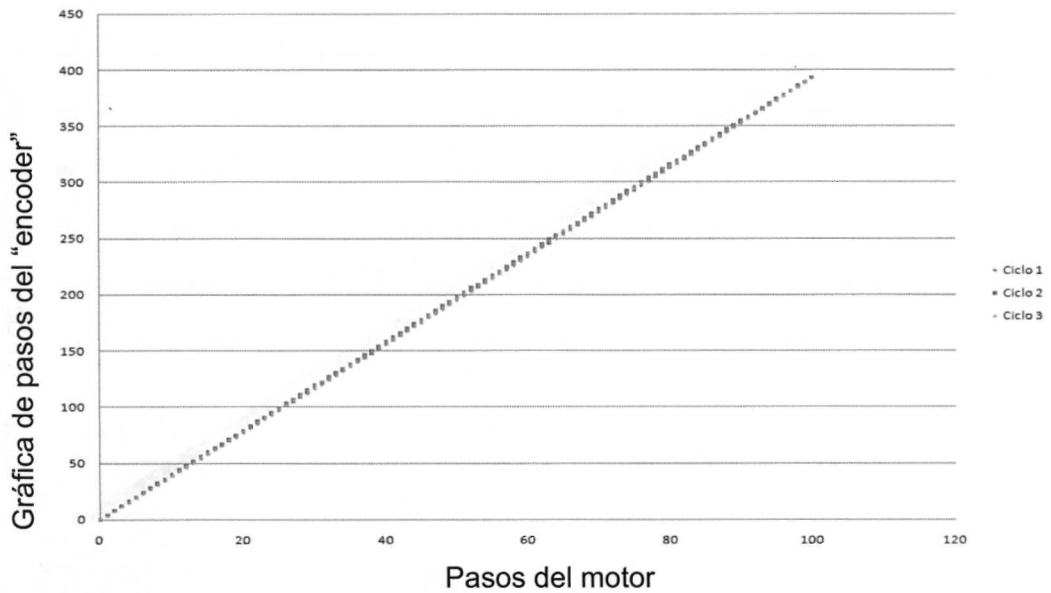


Figura C-4. Gráfica pasos del "encoder" contra pasos del motor, prueba [T1, P1, C]

Gráfica de medición del LVDT contra pasos del motor

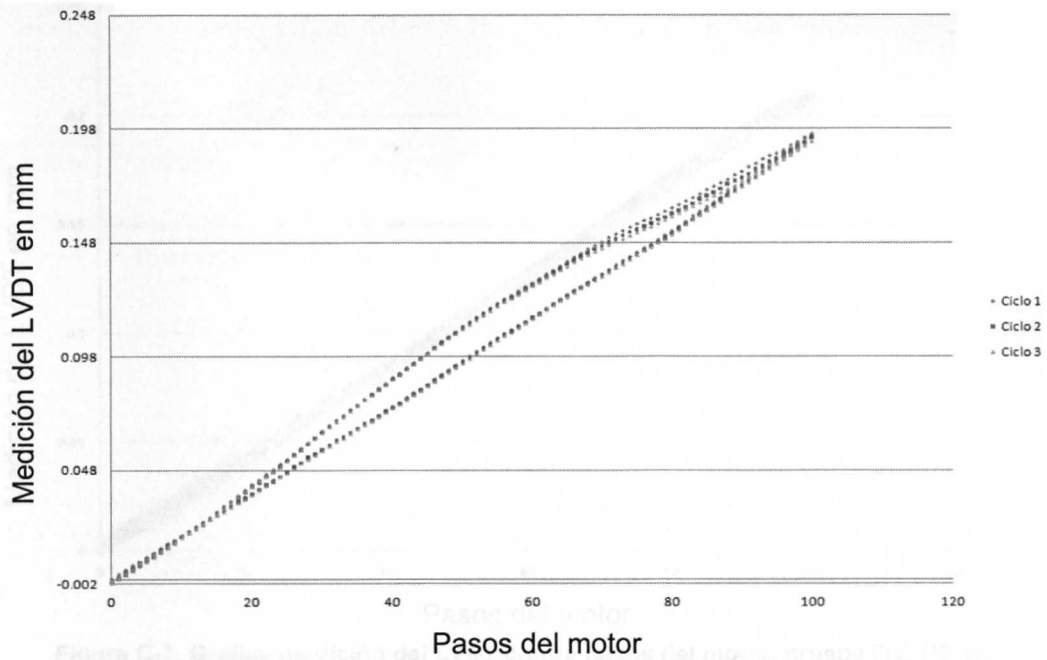


Figura C-5. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor, prueba [T1, P2, C]

Gráfica de pasos en el "encoder" contra pasos del motor

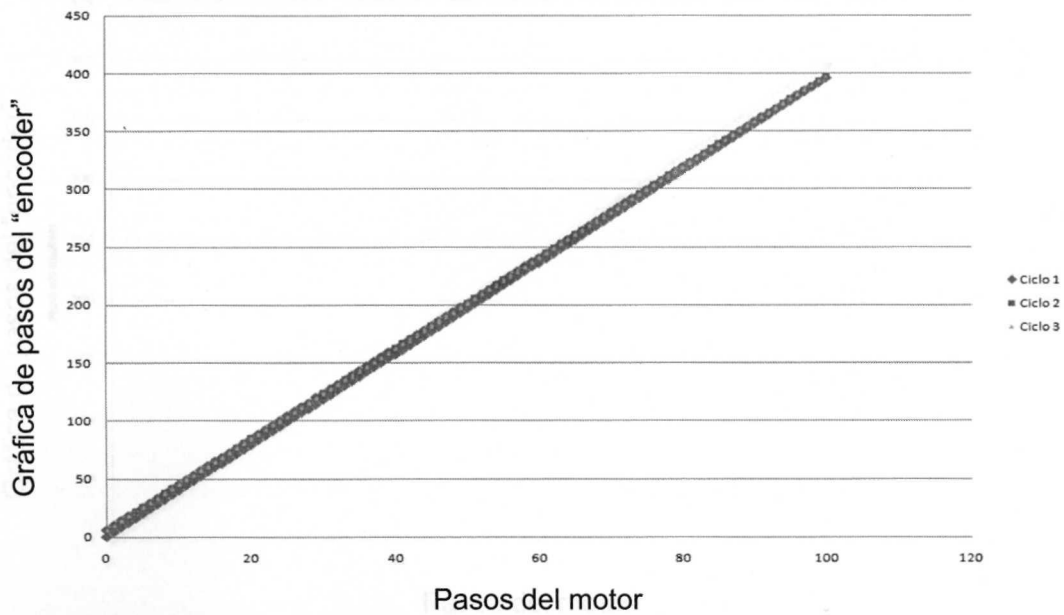


Figura C-6. Gráfica pasos del "encoder" contra pasos del motor, prueba [T2, P1, S]

Gráfica de medición del LVDT contra pasos del motor

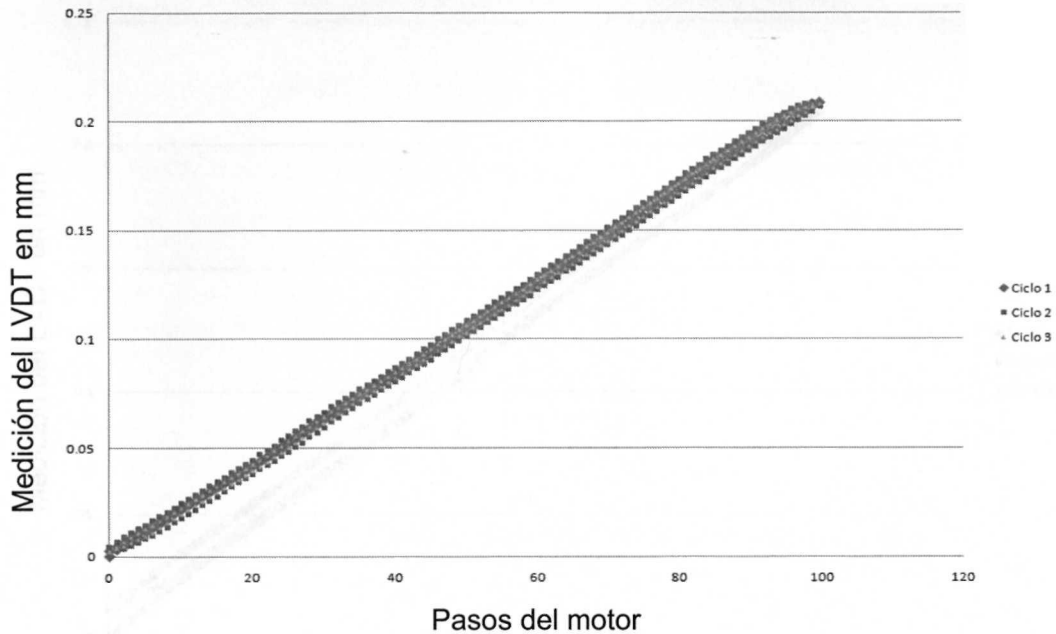


Figura C-7. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor, prueba [T2, P2, S]

Gráfica de pasos en el "encoder" contra pasos del motor

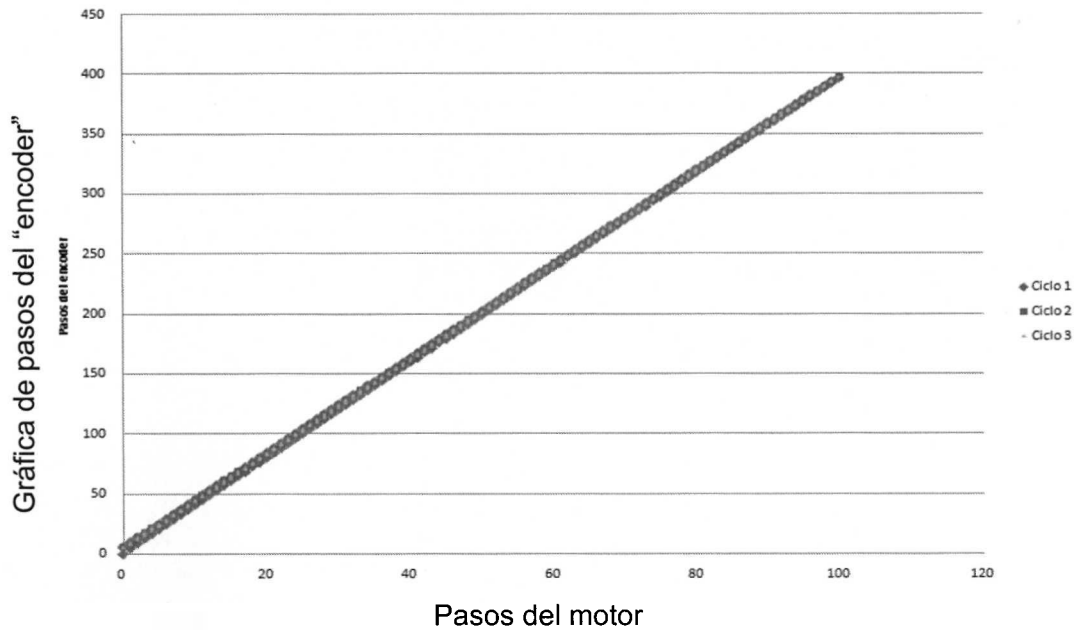


Figura C-8. Gráfica pasos del "encoder" contra pasos del motor, prueba [T2, P1, C]

Gráfica de medición del LVDT en mm contra pasos del motor

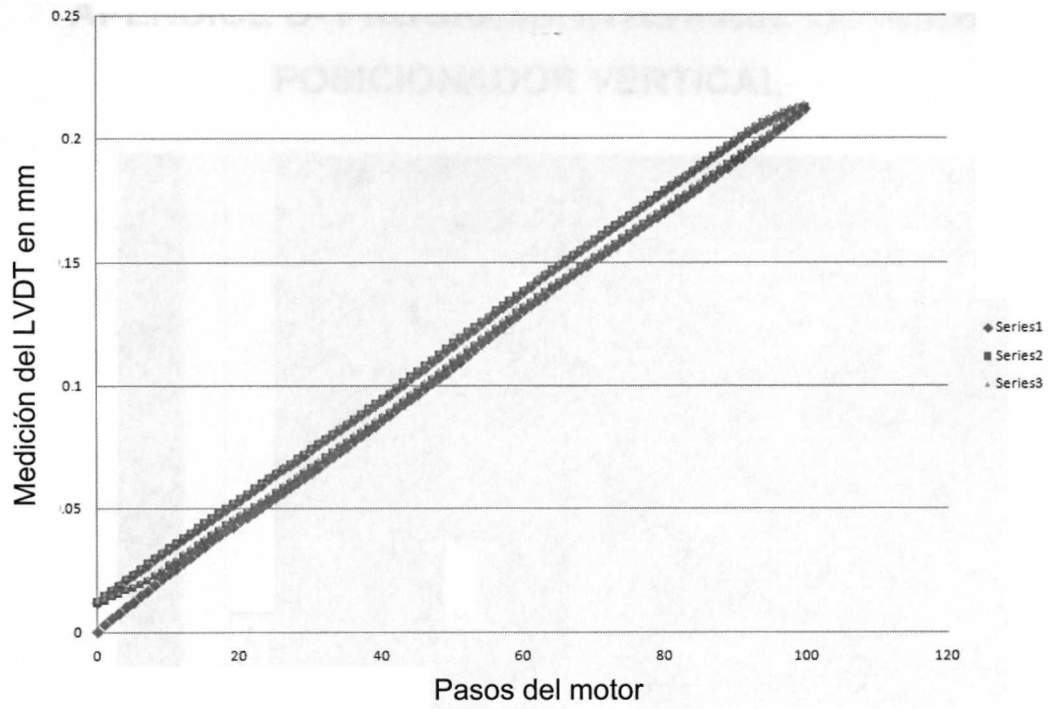
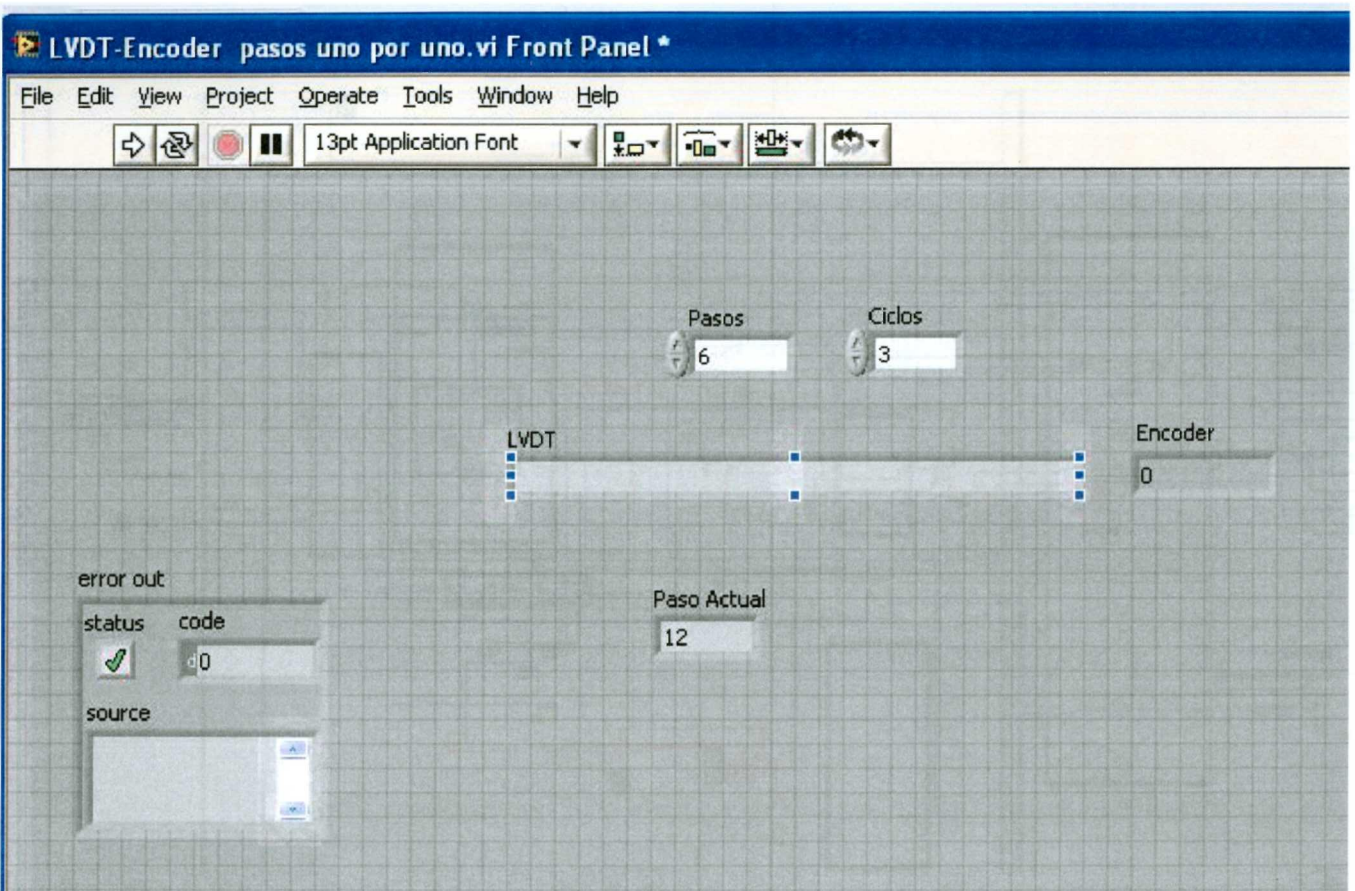


Figura C-9. Gráfica medición del LVDT contra pasos del motor, prueba [T2, P2, C]

APÉNDICE D. PROGRAMA INTERFASE LABVIEW POSICIONADOR VERTICAL



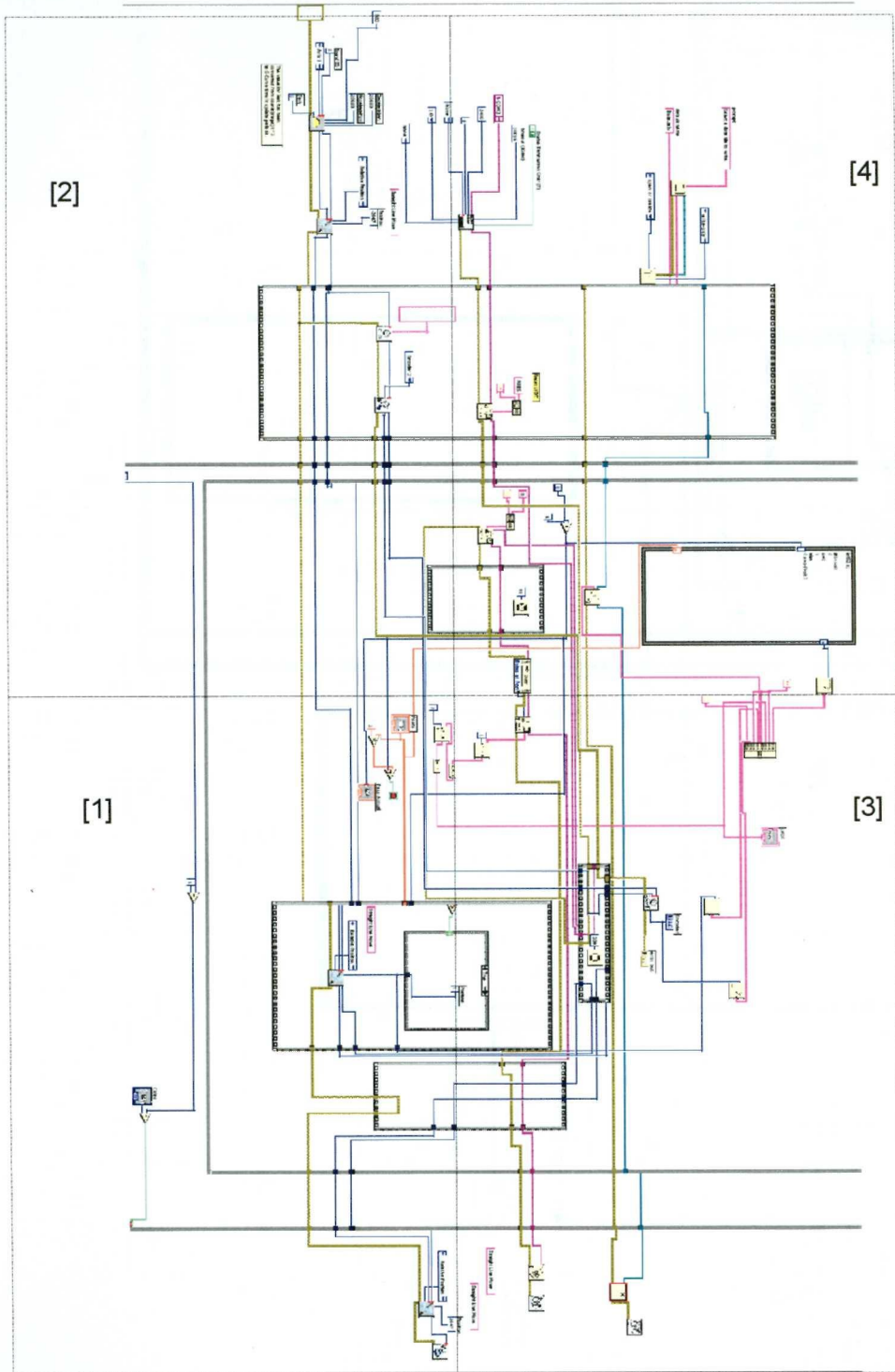
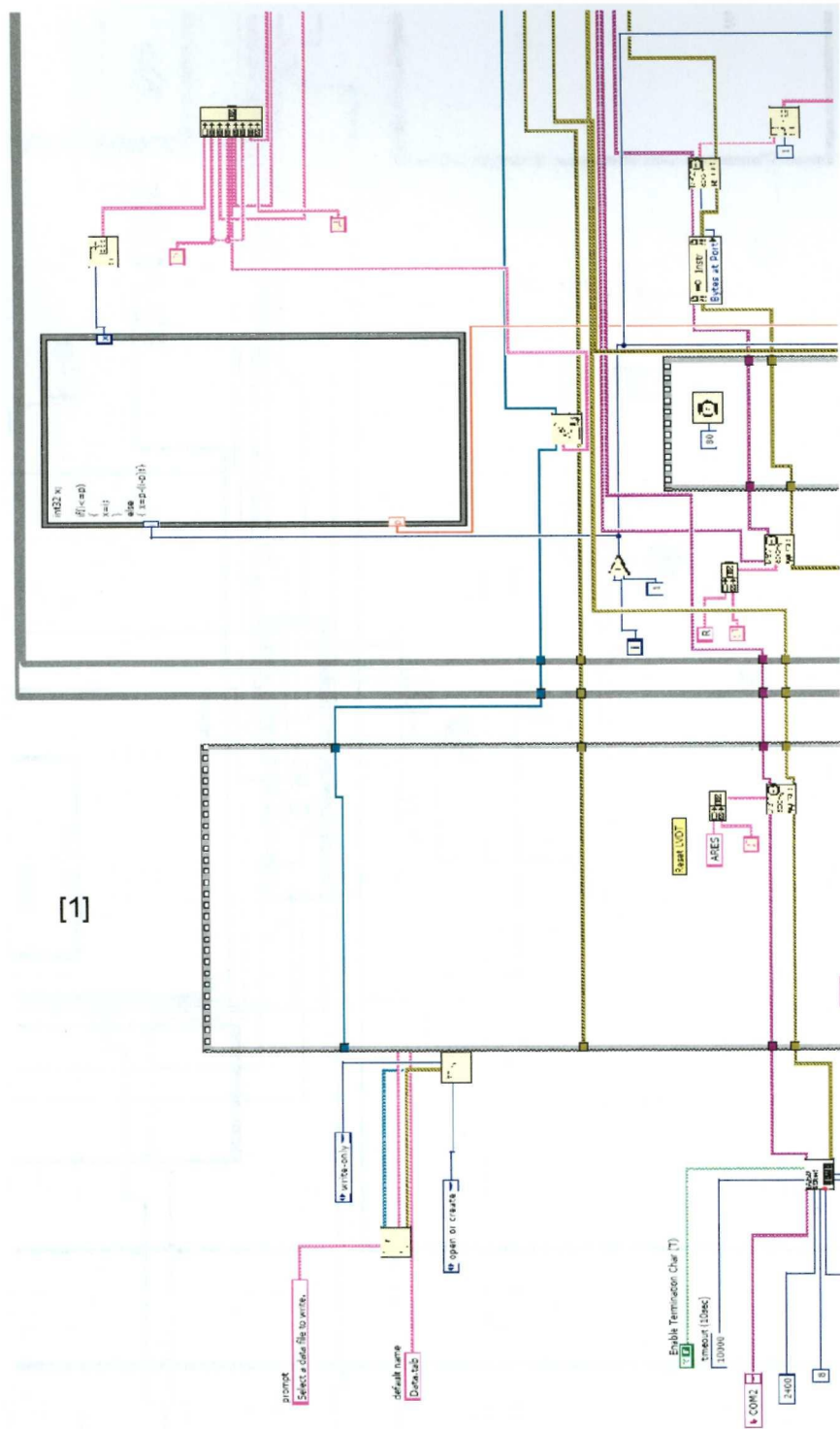
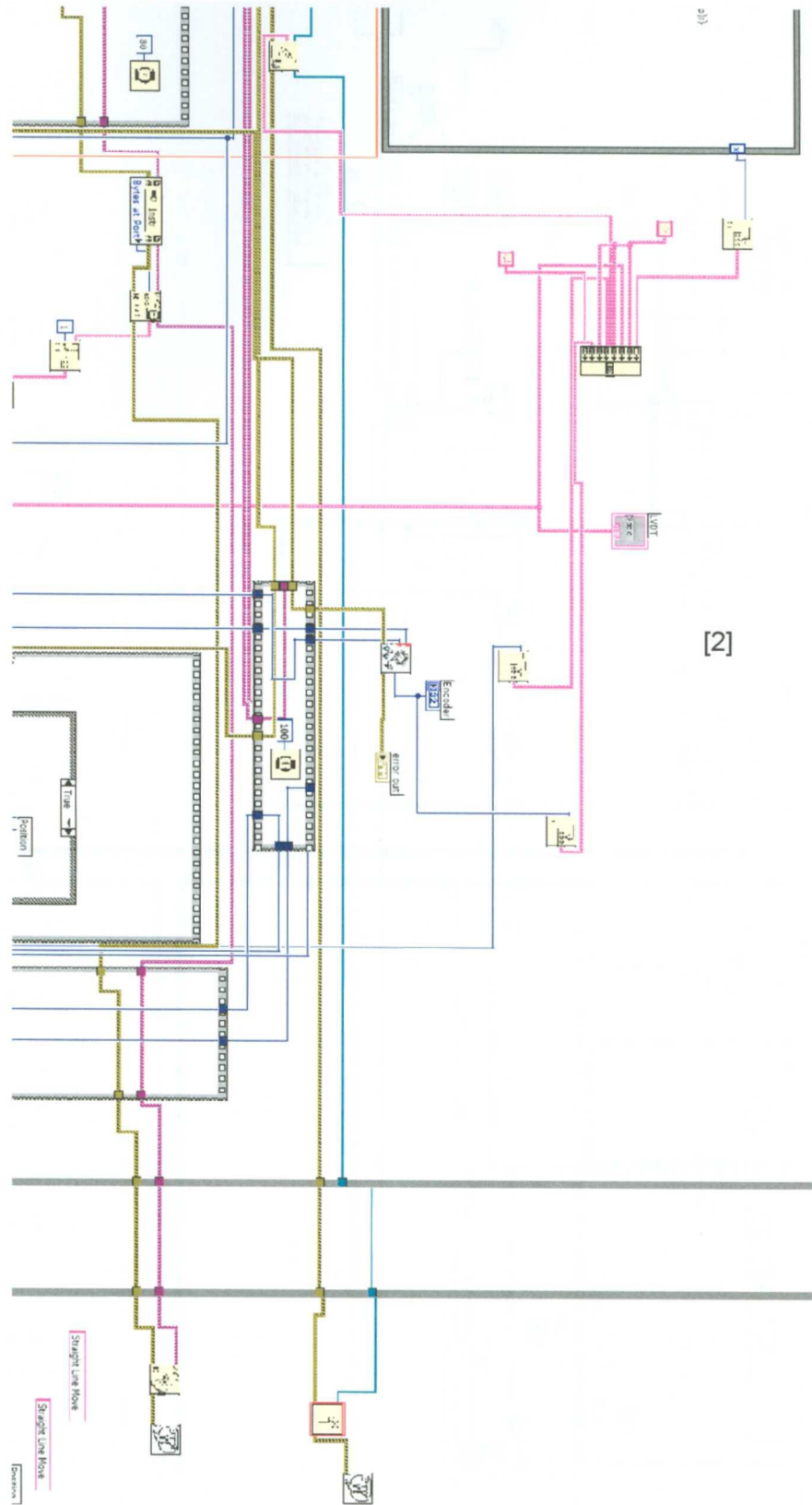


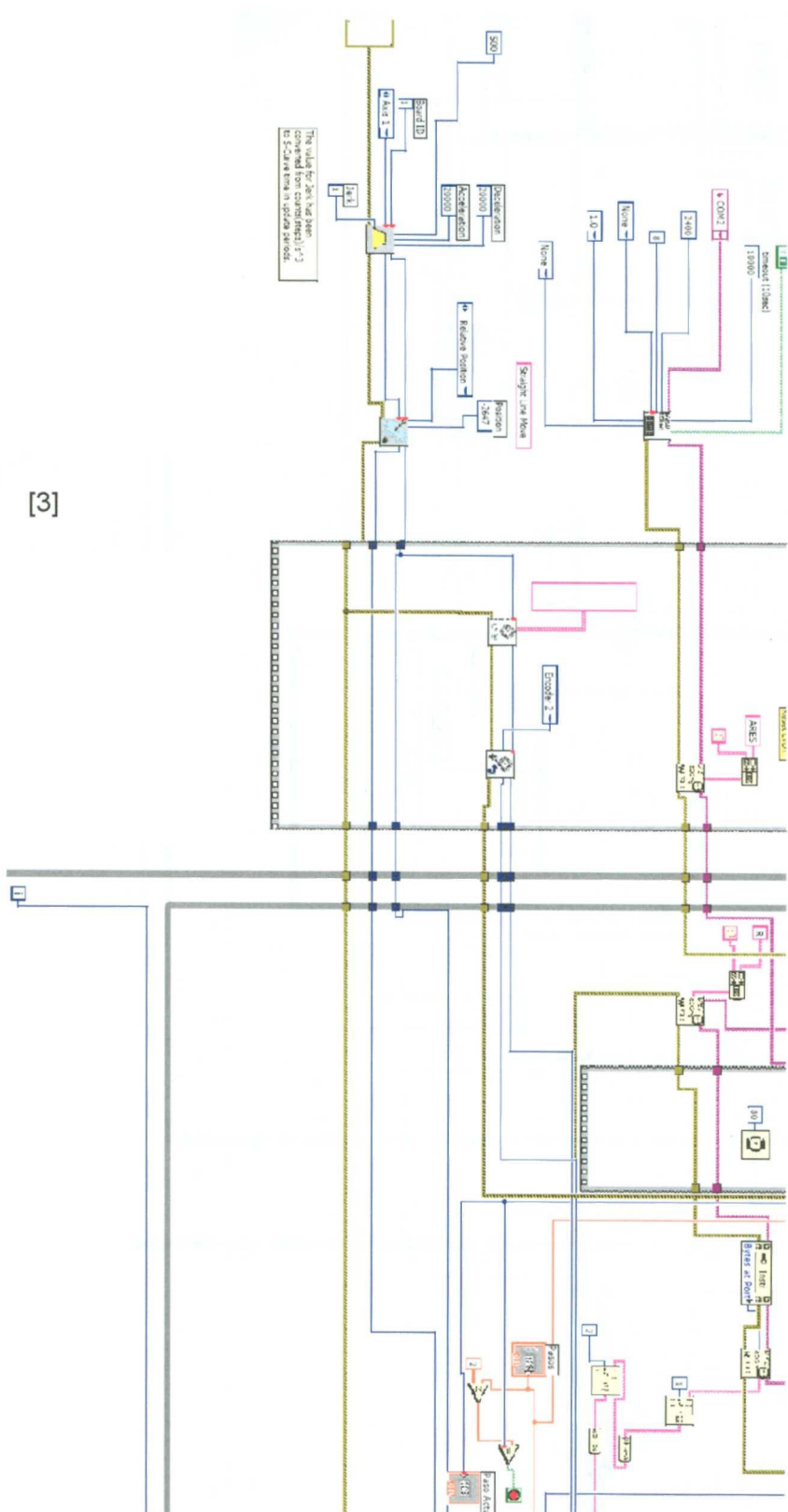
Diagrama de bloques



[1]



[2]



[3]

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey



30002007427503

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>