

**CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE
POSICIONAMIENTO X-Y CON DESPLAZAMIENTOS MICROMÉTRICOS
PARA UNA POSTERIOR APLICACIÓN EN PROCESOS DE
MICROFABRICACIÓN**

SEBASTIAN GUZMÁN DIAZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
MEDELLÍN
2009**

**CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE
POSICIONAMIENTO X-Y CON DESPLAZAMIENTOS MICROMÉTRICOS
PARA UNA POSTERIOR APLICACIÓN EN PROCESOS DE
MICROFABRICACIÓN**

SEBASTIAN GUZMÁN DIAZ

Trabajo de Grado

Presentado a:

Programa de ingeniería física

Asesor:

Juan Manuel Jaramillo

Co-asesor:

Alejandro Velásquez

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
MEDELLÍN
2009**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. <i>Objetivo general.</i>	15
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
2.2.1. Objetivo 1	15
2.2.2. Objetivo 2	15
2.2.3. Objetivo 3	15
2.2.4. Objetivo 4	15
2.2.5. Objetivo 5	15
2.2.6. Objetivo 6	15
2.2.7. Objetivo 7	16
2.2.8. Objetivo 8	16
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1. <i>Microlitografía</i>	17
3.1.1. Litografía por haz de iones focalizado (Focused Ion Beam, FIB)	18
3.1.2. Nanolitografía por dip-pen	18
3.1.3. Litografía por Estampación en caliente (Hot Embossing, HEL).....	19
3.1.4. Litografía por Nanoimpresión (Nanoimprint Lithography, NIL).....	19
3.1.5. Litografía óptica (fotolitografía)	19
3.2. <i>Microposicionador</i>	20
3.2.1. Articulaciones flexibles	21
3.2.2. Microposicionador monolítico de tres grados de libertad (XY θ).....	22
3.2.3. Nanómetro coplanar de cinco grados de libertad	23
3.2.4. Modelo Scott-Rusell	24
3.2.5. Guías de posicionamiento lineal con rodamientos	24
3.3. <i>Actuadores</i>	31
3.3.1. Piezoeléctricos.....	32

3.3.2.	Motor DC	34
3.3.3.	Motor paso a paso	34
4.	ALCANCE DEL PROYECTO.....	36
5.	METODOLOGÍA SUGERIDA.....	37
5.1.	<i>Etapa 1: revisión bibliográfica.....</i>	<i>37</i>
5.2.	<i>Etapa 2: definición de variables y elementos de control.....</i>	<i>37</i>
5.3.	<i>Etapa 3: diseño e implementación de experimentos.....</i>	<i>37</i>
5.4.	<i>Etapa 4: documentación.....</i>	<i>38</i>
6.	DISEÑO CONCEPTUAL	39
6.1.	<i>Especificaciones de diseño del producto</i>	<i>39</i>
6.2.	<i>Caja negra</i>	<i>42</i>
6.3.	<i>Estructura funcional</i>	<i>43</i>
6.4.	<i>Matriz morfológica.....</i>	<i>47</i>
6.5.	<i>Alternativas de solución</i>	<i>50</i>
6.6.	<i>Evaluación de alternativas de solución</i>	<i>52</i>
7.	MATERIALES Y MÉTODO	57
7.1.	<i>Plataforma X-Y</i>	<i>57</i>
7.2.	<i>Actuador.....</i>	<i>58</i>
7.3.	<i>Mecanismo</i>	<i>61</i>
7.4.	<i>Sensor de referencia</i>	<i>62</i>
7.5.	<i>Sensor principal</i>	<i>64</i>
7.6.	<i>Proceso de construcción</i>	<i>66</i>
7.7.	<i>Sistema de control.....</i>	<i>69</i>
7.8.	<i>Programación Microcontrolador.....</i>	<i>72</i>
8.	DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	79

8.1.	<i>Sensores</i>	79
8.2.	<i>Motores</i>	81
8.3.	<i>Pruebas y ensayos</i>	87
CONCLUSIONES		93
BIBLIOGRAFÍA		96

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1. Esquema de las partes de un instrumento para fotolitografía</i>	20
<i>Ilustración 2. Monolítico de doble muesca con movimiento de resorte rectilíneo</i>	22
<i>Ilustración 3. Movimiento de 2 Grados de Libertad</i>	22
<i>Ilustración 4. a) Diseño esquemático del PMK con tres grados de libertad b) Modelo de PMK para MEMS</i>	23
<i>Ilustración 5. Dibujo esquemático de los movimientos del actuador de cinco grados</i>	23
<i>Ilustración 6. Mecanismo de Scott-Rusell</i>	24
<i>Ilustración 7. Guías de posicionamiento lineal</i>	25
<i>Ilustración 8. Esquema de rodadura</i>	27
<i>Ilustración 9. Curvas de relación entre Fuerza y desplazamiento</i>	27
<i>Ilustración 10. Configuración esquemática de un sistema de guía lineal</i>	29
<i>Ilustración 11. Aplicaciones del efecto piezoeléctrico</i>	33
<i>Ilustración 12. Caja Negra</i>	42
<i>Ilustración 13. Estructura Funcional</i>	44
<i>Ilustración 14. Diagrama de Funciones</i>	45
<i>Ilustración 15. Cuadrantes para la Oblea de Silicio</i>	57
<i>Ilustración 16. Circuito para motores paso a paso</i>	59
<i>Ilustración 17. Tarjea electrónica para motores de paso</i>	60
<i>Ilustración 18. Esquema de Sensor Efecto Hall</i>	62
<i>Ilustración 19. Circuito del sensor de Efecto Hall</i>	63
<i>Ilustración 20. Calibración Sensor Efecto Hall 0-5V</i>	64
<i>Ilustración 21. a) encoder de 50 líneas. b) encoder de 100 líneas</i>	65
<i>Ilustración 22. Representación del montaje mecánico del sistema de posicionamiento XY</i>	67
<i>Ilustración 23. Ubicación de Microswitch</i>	68
<i>Ilustración 24. Acople entre tornillo y motor</i>	68
<i>Ilustración 25. Encoder y detector óptico</i>	69
<i>Ilustración 26. Esquema general del funcionamiento y estructura de la mesa XY</i>	69
<i>Ilustración 27. Movimientos Finales de la mesa XY</i>	71
<i>Ilustración 28. Diagrama de Flujo del programa</i>	73
<i>Ilustración 29. Curva de Sensor Efecto Hall 12-13 mm</i>	79
<i>Ilustración 30. Resortes de la mesa para un eje</i>	82
<i>Ilustración 31. Recorrido de la mesa en dirección X</i>	83
<i>Ilustración 32. Motor DC</i>	84
<i>Ilustración 33. Diagrama señal PWM</i>	85
<i>Ilustración 34. Circuito con puente H para motores con PWM</i>	85
<i>Ilustración 35. Tarjeta electrónica para motores DC</i>	86

<i>Ilustración 36. Gráfica de Desplazamientos Vs Pasos Encoder(X)</i>	89
<i>Ilustración 37. Gráfica de Desplazamientos Vs Pasos Encoder (Y)</i>	89
<i>Ilustración 38. Nuevos movimientos finales de la mesa XY</i>	91

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. PDS</i>	40
<i>Tabla 2 Matriz Morfológica</i>	47
<i>Tabla 3. Principios de solución de la Matriz Morfológica</i>	48
<i>Tabla 4. Alternativa de Solución 1</i>	50
<i>Tabla 5. Alternativa de Solución 2</i>	51
<i>Tabla 6. Alternativa de Solución 3</i>	51
<i>Tabla 7. Alternativa de Solución 4</i>	52
<i>Tabla 8. Importancia de los Parámetros</i>	53
<i>Tabla 9. Evaluación de alternativas de Solución</i>	54

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Ecuación de movimiento en sistemas SDOF m-c-k</i>	29
<i>Ecuación 2. Frecuencia natural</i>	29
<i>Ecuación 3. Tasa de amortiguación</i>	29
<i>Ecuación 4. Ecuación de movimiento reemplazando 2 y 3</i>	30
<i>Ecuación 5. Frecuencia natural normalizada</i>	30
<i>Ecuación 6. Tiempo normalizado</i>	30
<i>Ecuación 7. Ecuación de movimiento normalizada</i>	30
<i>Ecuación 8. Dinámica de un sistema con fricción histerética</i>	31
<i>Ecuación 9. Avance por paso</i>	61
<i>Ecuación 10. Ancho de línea de Encoder</i>	64
<i>Ecuación 11. Resolución de Voltajes para el microcontrolador</i>	79
<i>Ecuación 12. Error Acumulado del sistema</i>	90
<i>Ecuación 13. Error del Motor y Tornillo (X)</i>	91
<i>Ecuación 14. Error del Motor y Tornillo (Y)</i>	91

INTRODUCCIÓN.

La micro fabricación, también llamada micro manufactura es el término destinado a describir el proceso fabricación de pequeñas estructuras de tamaño micrométrico (MACK@, 2009).

Las tecnologías de la micro fabricación se originan a partir de la industria de la microelectrónica y los dispositivos usados comúnmente son obleas de silicio, incluso vidrio, plástico y otros sustratos utilizados (MACK@, 2009).

La fabricación microelectrónica, fabricación de semiconductores, fabricación de MEMS (Microelectromechanical systems) y tecnología de circuitos integrados son términos comúnmente utilizados en vez de micro fabricación, sin embargo, micro fabricación es el termino más ampliamente usado (MACK@, 2009).

La micro fabricación se remonta a los años 60's cuando aparecieron los primeros sensores de presión para aplicaciones industriales y aeroespaciales. Sin embargo, en los ochenta estos lograron gran popularidad con las dos aplicaciones más revolucionarias: los sensores de presión en automóviles para el control de emisiones y los sensores de presión de sangre descartables (BRYZEK, 1996).

La microelectrónica y el micro maquinado hacen parte de las técnicas de manufactura de la microingeniería. La primera produce circuitos electrónicos en chips de silicio, y es una tecnología bien establecida. La segunda, es el nombre de las técnicas usadas para producir las estructuras y partes móviles de los microsistemas (SANDOOVAL-IBARRA@, y otros, 1996).

La microingeniería es un campo en el cual convergen diferentes y muy variadas disciplinas, tecnologías y áreas del conocimiento, entre las cuales se encuentran: la

instrumentación, los sistemas de vacío, los sistemas de control y automatización, la física y química de materiales, la metrología óptica, entre muchas otras.

El aprendizaje y la investigación de las aplicaciones logradas con estos dispositivos son parte indispensable de la formación de los nuevos profesionales. Por este motivo, este trabajo propone el desarrollo de parte de la infraestructura que permita el impulso de estas tecnologías en la universidad.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La tendencia de la tecnología a evolucionar hacia sistemas cada vez más compactos y eficientes, demanda a los nuevos ingenieros el estudio de los procesos de miniaturización. La microingeniería posibilita la incorporación de la microelectrónica en estructuras micromaquinadas para producir sistemas completamente integrados, conocidos como MEMS (Micro Electrical Mechanical System) (LOPERA@, y otros, 2009).

El desarrollo de tecnologías de fabricación, manipulación y caracterización de micro dispositivos ha permitido a los países desarrollados, el registro de un gran número de patentes importantes en áreas que van desde las telecomunicaciones hasta la medicina, las cuales gracias a la característica de producción en masa constituyen un mercado mundial de miles de millones de dólares (LOPERA, y otros, 2007).

El proceso de apropiación en Colombia, de este tipo de tecnologías se ha iniciado con el desarrollo de equipos necesarios para la implementación de cada técnica.

Los procesos de micro fabricación comprenden en gran medida, el uso de sistemas de posicionamiento *XY*, sistemas ampliamente utilizados en ambientes industriales a mediana y gran escala, un ejemplo de ello es el sector metalmecánico (IntelLiDrives@, 2009).

El sistema utilizado en las maquinas CNC empleadas en el sector metalmecánico se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático (software) ejecutado por medio de un computador (ALDABALDETRECU@, 2002).

El sistema utilizado en las CNC impide la portabilidad de la maquina, incluso para piezas pequeñas (microfabricacion); sin embargo, mediante el empleo de microcontroladores se tiene la posibilidad de manejar variedad de dispositivos de

entrada y/o salida con la posibilidad de dispositivos portables e independientes de una computadora para el desarrollo de pequeñas tareas, las cuales no exijan considerables velocidades de control y automatización (MICROCHIP®, 2009).

Los sistemas de control de posicionamiento micrométrico en la actualidad son costosos y de difícil apropiación (RONG-FONG, YI-LUNG, & MING-SHYAN, 2009) por lo que se explora la posibilidad de controlar sistemas de posicionamiento micrométrico a través de actuadores comerciales.

Esto encaminado a desarrollar un control adecuado sobre sistemas micrométricos para su posterior uso en procesos de micro fabricación, para el caso pensado en el presente trabajo se explora la iniciativa de una fuente en reposo relativo y el objetivo de fabricación en movimiento respecto a la posición del dispositivo de escritura.

Una primera etapa del proyecto global es el diseño y control de la posición en dos ejes para luego pasar a controlar la fuente de luz.

2. OBJETIVOS.

2.1. Objetivo general.

Diseñar e implementar un sistema de control de un dispositivo de posicionamiento XY con desplazamientos micrométricos para una posterior aplicación en procesos de micro fabricación.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Objetivo 1

Reunir la información pertinente sobre los procesos y técnicas que emplea la Microingeniería orientada a la microfabricación y sus sistemas de posicionamiento.

2.2.2. Objetivo 2

Reconocer las variables que interactúan en el proceso de posicionamiento del sistema XY.

2.2.3. Objetivo 3

Verificar los elementos electro-mecánicos que permiten realizar los procesos, controlando las variables del mismo.

2.2.4. Objetivo 4

Definir los elementos a utilizar en el sistema de control para el dispositivo de posicionamiento XY.

2.2.5. Objetivo 5

Implementar el sistema de control para el dispositivo con desplazamientos en los ejes X, Y.

2.2.6. Objetivo 6

Identificar el desplazamiento real efectuado por el sistema.

2.2.7. Objetivo 7

Realizar un protocolo para que el usuario pueda interactuar con dicha mesa.

2.2.8. Objetivo 8

Concluir los principales resultados obtenidos en el proyecto.

3. MARCO TEÓRICO

Las tecnologías de microfabricación han evolucionado rápidamente durante los últimos 40 años, además de esta evolución, las tecnologías de microfabricación son y pueden ser usadas por un creciente número de diferentes dispositivos y aplicaciones que incluyen dispositivos optoelectrónicos, fotónicos, magnéticos, sensores y actuadores de toda clase de aplicaciones, los MEMS y demás microestructuras para aplicaciones de biotecnología y/o experimentales (CRUZ@, 2009).

Las microtecnologías, también llamadas tecnologías de micro fabricación son un sinónimo de revolución tecnológica, social y sobre todo, de progreso industrial. Las aplicaciones actuales de estas tecnologías son bien conocidas: los catéteres e instrumental quirúrgico, los conectores de fibra óptica, las máquinas de fabricación con herramienta con punta de diamante, instrumentos científicos de medición o aplicaciones ópticas son sólo algunos ejemplos de una técnica que tiene aún mucho terreno por descubrir. (PUIG@, y otros, 2008)

Las micromáquinas, llamadas de este modo no por su tamaño sino por su capacidad para trabajar con lo extremadamente pequeño (PUIG@, y otros, 2008) son quienes hacen posible este tipo de procesos y maquinados. Por ejemplo, en los microscopios de fuerza atómica, los más potentes que existen en la actualidad, se necesitan mesas de posicionamiento con movimientos XY ultra precisos. De igual manera en diversos procesos de micro fabricación como en micro litografía se emplean este tipo de micro máquinas, hacia las cuales está orientado este proyecto.

3.1. Microlitografía

La principal técnica de microfabricación, utilizada tanto en la microelectrónica como en el micromaquinado, es la microlitografía óptica. Esta técnica permite el grabado de figuras y patrones en un polímero fotosensible, cambiando sus propiedades químicas al

ser expuesto ante radiación ultravioleta; pudiendo ser empleado en la producción de máscaras, moldes, o guías para procesos posteriores de microfabricación (LOPERA@, y otros, 2009).

Las diferentes técnicas de litografía incluyen la litografía óptica, la cual consiste en proyectar una imagen sobre un sustrato a través de una máscara. Otra de las técnicas empleadas es la denominada por escritura directa, la cual busca eliminar en el proceso las máscaras, dado el costo de las mismas (70-100 USD). Adicionales a estas técnicas, se han venido desarrollando otras. Algunas de las técnicas de microlitografía actuales son:

3.1.1. Litografía por haz de iones focalizado (*Focused Ion Beam, FIB*)

La litografía por haz de iones focalizado, FIB, utiliza un haz de iones de galio para realizar tanto grabados como depósitos localizados en la superficie de los materiales. El sistema permite visualizar y controlar in situ los procesos que se realizan gracias al doble haz (dual beam), que combina el haz de iones con un haz de electrones. Ambos son confocales y forman entre sí un ángulo de 52°.

La técnica permite realizar estructuras tridimensionales. Asimismo, es posible controlar estos procesos con una precisión de decenas de nanómetros (30nm) (PCB@, 2009).

3.1.2. Nanolitografía por dip-pen

El sistema de nanolitografía por dip-pen se compone de un microscopio de fuerza atómica (Atomic Force Microscope, AFM), una cabina de control ambiental (temperatura y humedad relativa) y el software de control adecuado para realizar nanolitografía. El proceso de dip-pen permite depositar compuestos como biomoléculas, resinas, polímeros y otros materiales con resolución nanométrica y sin necesidad de máscaras. (PCB@, 2009).

3.1.3. Litografía por Estampación en caliente (Hot Embossing, HEL)

El proceso de hot embossing se utiliza para replicar estructuras micrométricas sobre polímeros termoplásticos. Se realiza en una prensa en la que la temperatura y la presión aplicadas se controlan automáticamente.

En esta técnica la resolución lateral (tamaño de las estructuras más pequeñas replicables) es de 3 μm (PCB@, 2009).

3.1.4. Litografía por Nanoimpresión (Nanoimprint Lithography, NIL)

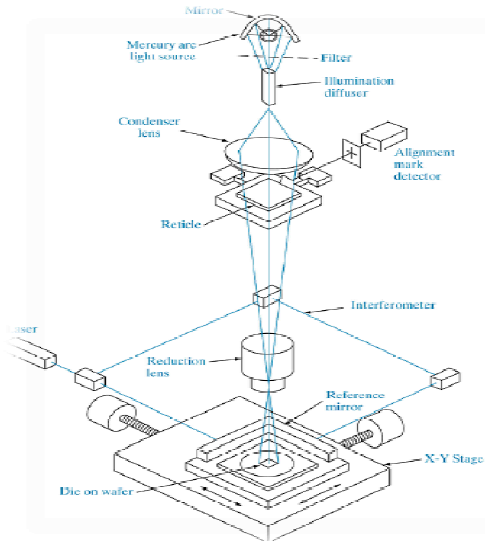
El proceso de Nanoimprint Lithography (NIL) se utiliza para replicar estructuras nanométricas en polímeros termoplásticos aplicando presión y temperatura controladas. La nanoimpresión permite utilizar el polímero estructurado como máscara de grabado. La dimensión mínima de las estructuras estampables es de 30nm (PCB@, 2009).

3.1.5. Litografía óptica (fotolitografía)

La Fotolitografía o litografía óptica es un proceso empleado en la fabricación de dispositivos semiconductores o circuito integrado. El proceso consiste en transferir un patrón desde una fotomáscara (denominada retícula) a la superficie de una oblea. (FRANSSILA, 2004).

Los componentes principales de un equipo para realizar micro litografía óptica, pueden observarse a continuación.

Ilustración 1. Esquema de las partes de un instrumento para fotolitografía



(FRANSSILA, 2004)

La fotolitografía trae consigo gran cantidad de mecanismos y accesorios, sin embargo, en este trabajo, solo se estudiarán los sistemas de posicionamiento XY.

3.2. Microposicionador

Los microposicionadores juegan un rol fundamental en la tecnología moderna. Estos encuentran aplicación en diversos campos, tales como los ya mencionados micro maquinados y sondas de escaneo en microscopía (de efecto túnel, fuerza atómica, entre otras) (YAO@, y otros, 2006).

La etapa de microposicionamiento generalmente hace referencia a un sistema que automáticamente puede mover un determinado objeto (plataforma) con determinados grados de libertad (Degrees-of-Freedom, DOF) en su espacio de trabajo, y a su vez, mantiene una resolución para su posición micrométrica (YAO@, y otros, 2006).

Uno de los más elementales atributos de rendimiento de una etapa de microposicionamiento es la habilidad de mover la plataforma solamente con los grados

de libertad deseados, lo que conlleva a que todos los movimientos indeseados queden restringidos. Esto se ha logrado a través de varios enfoques diferentes. Uno de los enfoques implica el diseño y la utilización de determinados tipos o modalidades de las articulaciones. Por ejemplo, las ranuras en V se utilizan en la etapa de posicionamiento con grados de libertad en XY con el fin de evitar las rotaciones indeseadas (YAO@, y otros, 2006).

Un segundo objetivo importante para el desempeño del diseño de la etapa de microposicionamiento es la habilidad de alcanzar una alta resolución de posicionamiento. Actuadores con alta resolución de posicionamiento, tales como actuadores electromagnéticos y actuadores piezoeléctricos son empleados.

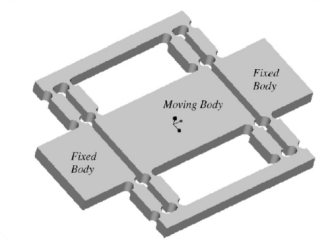
Otros métodos para obtener una alta resolución de microposicionamiento incluyen la reducción de la proporción señal-ruido del sistema eléctrico y el aislar el sistema del ruido de fondo y las vibraciones (YAO@, y otros, 2006).

Algunos de los modelos de microposicionamiento más empleados son:

3.2.1. *Articulaciones flexibles*

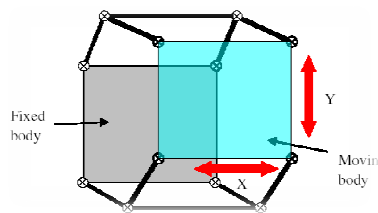
La fricción y la reacción tradicional de retroceso en las articulaciones son características indeseables en este tipo de sistemas de microposicionamiento. Como un esfuerzo para eliminarlas una unión flexible se propuso en la década de 1960. Las articulaciones flexibles no tienen fricción por retroceso. Adicionalmente, son libres de desgaste y se pueden hacer como un elemento monolítico. Si las curvas de fuerza-desplazamiento son conocidas, entonces todos los desplazamientos que sean continuos en todos los rangos pueden ser calculados a partir de la fuerza externa. Sin embargo, estas articulaciones poseen una serie limitada de movimientos (YEONG-JUN, y otros, 2007).

Ilustración 2. Monolítico de doble muesca con movimiento de resorte rectilíneo



(YEONG-JUN, y otros, 2007)

Ilustración 3. Movimiento de 2 Grados de Libertad

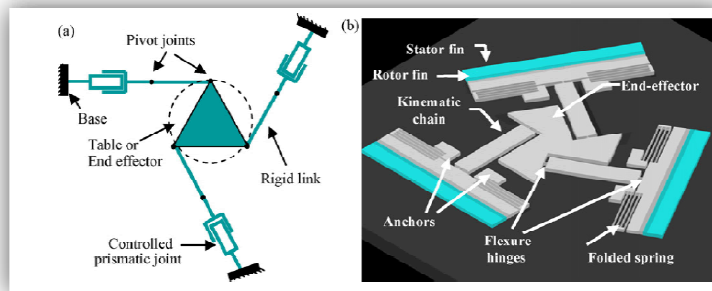


(YEONG-JUN, y otros, 2007)

3.2.2. Microposicionadores monolíticos de tres grados de libertad (XY θ)

El sistema se basa en un mecanismo cinemático paralelo (PMK) que permite la traslación a lo largo del plano XY y la rotación en el eje Z. Este tipo de microposicionadores es usado generalmente en procesos que requieren movimientos rotacionales tales como submicrolitografía, microalineamientos, microsensores de fuerza, lentes de escáneres ópticos, entre otros (MUKHOPADHYAY, y otros, 2008).

Ilustración 4. a) Diseño esquemático del PMK con tres grados de libertad b) Modelo de PMK para MEMS

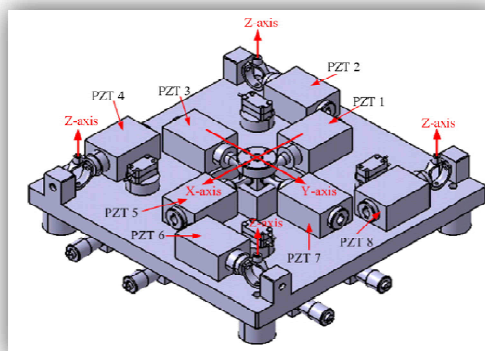


(MUKHOPADHYAY, y otros, 2008)

3.2.3. Nanómetro coplanar de cinco grados de libertad

La estructura flexible coplanar incluye un cuerpo cilíndrico flexible y un arco flexible. Permite la traslación en los tres y dos movimientos de rotación y está provisto de ocho actuadores piezoeléctricos: uno en el eje X, otro sobre el eje Y, y los otros en el eje Z. Las principales aplicaciones pueden encontrarse en el AFM y en el SPM (WEN-YUH, y otros, 2007).

Ilustración 5. Dibujo esquemático de los movimientos del actuador de cinco grados de libertad

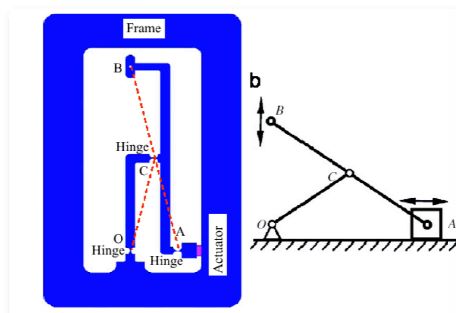


(WEN-YUH, y otros, 2007)

3.2.4. *Modelo Scott-Rusell*

Los mecanismos, basados en los sistemas de flexión poseen las ventajas inherentes de no poseer ninguna reacción de retroceso, fricción insignificante, no lubricación, y libre de generación térmica comparado con los mecanismos convencionales. Además, puede ser fabricado monolíticamente para reducir los errores de montaje y la garantía de precisión de mecanizado. Basado en el voltaje aplicado, un actuador piezoeléctrico puede generar expansiones y contracciones continuas con infinita resolución, sin retrocesos y una amplia respuesta dinámica (TIAN, y otros, 2008).

Ilustración 6. Mecanismo de Scott-Rusell



(TIAN, y otros, 2008)

3.2.5. *Guías de posicionamiento lineal con rodamientos*

El sistema se desplaza a lo largo del plano XY por medio de tornillos micrométricos. Es el sistema más sencillo y muy utilizado en sistemas que no requieran una muy alta precisión. Ver Figura 7.

Ilustración 7. Guías de posicionamiento lineal



(NEWPORT CORPORATION@c, 2009)

Los elementos rodantes tales como tornillos de bolas y guías lineales son comúnmente utilizados para este tipo de dispositivos de precisión para posicionamiento (OTSUKA y MASUDA 1998). Las guías de movimiento lineal como tornillos de bolas y guías lineales son ampliamente usadas en sistemas de posicionamiento ultra preciso para el transporte de partes maquinables a lo largo de un recorrido lineal en centros de manufactura, mesas XY, entre otras. Las guías de movimiento lineal con rodamientos tienen diversas ventajas como alta rigidez, buena confiabilidad y bajo costo (YI, y otros 2008).

Antes de que empiecen a rodar, estos elementos exhiben un comportamiento previo a la rodadura, denominado “comportamiento de resorte no lineal” (NSB), conocido también a nivel industrial como “histéresis elástica” (OTSUKA y MASUDA 1998).

La histéresis elástica origina los siguientes fenómenos:

- Cuando el torque de un motor es liberado después de que un brazo robótico ha dejado de moverse por acción del motor, el brazo sufre un retroceso.

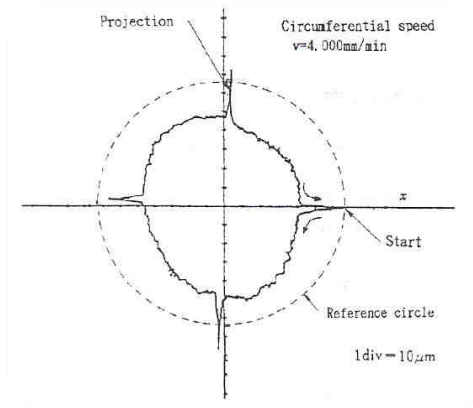
- En un proceso llevado a cabo por pasos o etapas en las cuales se usa una guía lineal de bolas o un tornillo de bolas, estos empiezan a vibrar en las vecindades de la posición objetivo.
- Cuando un centro de maquinado taladra un agujero en una mesa XY que utiliza un sistema de retroalimentación semicerrado, las proyecciones del error del contorno del agujero son debidas al NSB cuando el movimiento de la mesa se encuentra en dirección de retroceso (OTSUKA y MASUDA 1998).

El comportamiento dinámico no lineal de los rodamientos de bolas debe ser considerado con el fin de obtener una adecuada predicción del movimiento de las guías lineales (YI, y otros 2008).

Las características dinámicas de estas guías lineales pueden ser clasificadas en dinámica con deformación elástica inducida y dinámica con fricción inducida. La dinámica con fricción inducida se refiere a la dinámica de las guías lineales en la dirección de su movimiento, mientras la deformación elástica inducida se refiere a las otras direcciones. (YI, y otros 2008)

Cuando la fuerza aplicada F se incrementa, existe un movimiento relativo entre piezas de los elementos con rodamientos por medio de bolas, en este caso se expresa en la siguiente ilustración como un desplazamiento de la parte superior con respecto a la inferior (OTSUKA y MASUDA 1998).

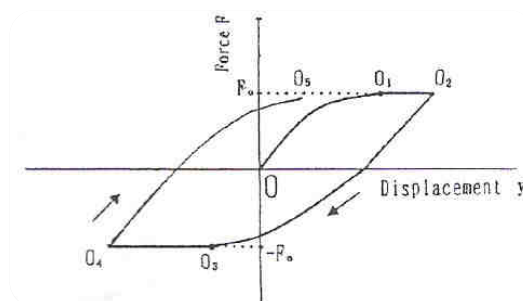
Ilustración 8. Esquema de rodadura



(OTSUKA y MASUDA 1998)

La Ilustración 9 muestra la curva que relaciona la fuerza F con el desplazamiento Y . El desplazamiento inicial en función de la fuerza es 00_1 . Este comportamiento es causado por la deformación elástica de los elementos que generan la condición de rodadura y las guías, al igual que el deslizamiento entre ellos. Cuando F supera la fuerza de fricción de rodadura, el sistema empieza a rodar y su curva es 0_10_2 . Con la fuerza opuesta de F , la relación entre F y Y corresponde a la curva 0_20_3 . La curva 0_30_4 es causada por la rodadura de manera análoga a 0_10_2 . El comportamiento a lo largo de las curvas $00_1, 0_20_3$ y 0_40_5 corresponde al denominado NSB (OTSUKA y MASUDA 1998).

Ilustración 9. Curvas de relación entre Fuerza y desplazamiento



(OTSUKA y MASUDA 1998)

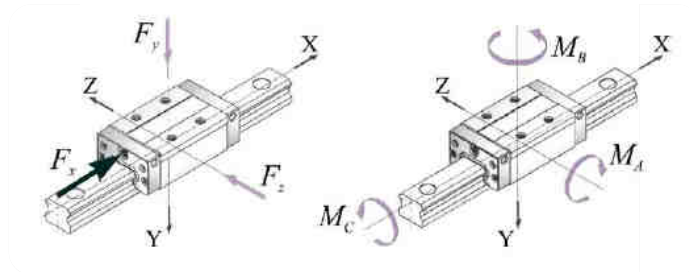
Las guías comprimen los rodamientos para soportar el movimiento lineal de los ejes de la mesa. Con el fin de realizar pequeños y precisos movimientos con este tipo de maquinas, sin la necesidad de bajas velocidades, las características dinámicas de las guías deben ser bien comprendidas. Los diseñadores y constructores de estos sistemas no son claros acerca de la cantidad de rigidez y amortiguación de los que deben ser provistos estas guías (o alguna otra parte del mecanismo). Estas características se originan del comportamiento no lineal debido a grandes contactos, la física al interior de este tipo de fenómenos no es claramente entendida (AL-BENDER y SYMENS 2005).

Uno de los fenómenos no lineales que obstaculiza una caracterización sencilla de la dinámica de las guías de bolas es la fricción entre partes que se mueven relativamente entre sí. La descripción del fenómeno de la fricción está ampliamente documentada en la literatura, a pesar de que la naturaleza del fenómeno no es bien entendida aún (AL-BENDER, SYMENS y SWEVES, y otros 2004).

La fuerza resultante de la fricción puede ser tanto dependiente de la velocidad como del desplazamiento. La dependencia del desplazamiento origina el fenómeno de microdeslizamiento y puede ser descrito por una función de histéresis independiente de la tasa de desplazamiento (AL-BENDER y SYMENS 2005).

Un sistema de guía lineal permite un grado de libertad (desplazamiento a lo largo de un eje) y suprime los otros 5 grados (ver Ilustración 10). Este sistema puede ser modelado como una masa moviéndose en una dirección con fuerzas de fricción entre la masa y el suelo. Como el sistema es lineal, el problema se reduce a considerar un sistema simple masa-amortiguación-resorte ($m-c-k$) de un grado de libertad en la dirección del desplazamiento (SDOF) (AL-BENDER y SYMENS 2005).

Ilustración 10. Configuración esquemática de un sistema de guía lineal



(AL-BENDER y SYMENS 2005)

La ecuación de un sistema SDOF m - c - k está dada por

Ecuación 1. Ecuación de movimiento en sistemas SDOF m - c - k

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

(AL-BENDER y SYMENS 2005)

Siendo F la fuerza externa (dinámica), x el desplazamiento en la dirección del eje X y los puntos representan las derivadas con respecto al tiempo. Definiendo la frecuencia natural y la tasa de amortiguación como

Ecuación 2. Frecuencia natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación 3. Tasa de amortiguación

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

(AL-BENDER y SYMENS 2005)

La Ecuación 1 puede expresarse entonces de la forma

Ecuación 4. Ecuación de movimiento reemplazando 2 y 3

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F}{m}$$

Normalizando el tiempo y la frecuencia natural

Ecuación 5. Frecuencia natural normalizada

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Ecuación 6. Tiempo normalizado

$$\tau = \omega_n t$$

(AL-BENDER y SYMENS 2005)

La Ecuación 4 se convierte en

Ecuación 7. Ecuación de movimiento normalizada

$$x'' + 2\zeta x' + x = \frac{F}{\omega_n^2 m} = \bar{F}$$

(AL-BENDER y SYMENS 2005)

Las comillas denotan derivadas respecto a τ . Esta forma normalizada de la ecuación de movimiento de un sistema lineal de segundo orden muestra que existe un sólo parámetro que determina el comportamiento dinámico del sistema; llamado, tasa equivalente de amortiguación ζ . En un sistema lineal, ζ es constante. En un sistema linealizado equivalente de un sistema no lineal ζ generalmente depende de la amplitud de oscilación y/o frecuencia (AL-BENDER y SYMENS 2005).

Por fricción histerética se entiende una fuerza de fricción que es descrita por un desplazamiento dependiente de una función de histéresis. Este tipo de histéresis puede ser simulada por el modelo denominado "Maxwell-slip" que consiste en una serie de

bloques de Coulomb con fricción, conectados entre sí de forma paralela por resortes. Este modelo se caracteriza por su “memoria”. La dinámica del sistema responde a la ecuación 8.

Ecuación 8. Dinámica de un sistema con fricción histerética

$$m\ddot{x} + \phi(x, \text{his}(x_m^i)) = F(t)$$

(AL-BENDER y SYMENS 2005)

$\phi(x, \text{his}(x_m^i))$ Representa la fuerza de fricción histerética. En esta fórmula (x_m^i) representa toda la historia del movimiento que es relevante para el futuro movimiento y que por tal razón debe mantenerse en memoria (AL-BENDER y SYMENS 2005).

Esta ecuación altamente no lineal que describe la dinámica del movimiento de una masa sujeta a fricción histerética puede ser resuelta analíticamente sólo para el caso de respuesta libre en donde $F(t)=0$; en el caso general en donde $F(t) \neq 0$ no es posible obtener una solución analítica (AL-BENDER y SYMENS 2005). Por lo tanto, para sistemas cuyos movimientos sean muy pequeños, la histéresis posee gran influencia.

3.3. Actuadores

Los dispositivos dinámicos de posicionamiento para elementos de dimensiones pequeñas son un interesante campo para los microactuadores. Campos de acción que traen consigo amplias aplicaciones son la microóptica y la microbiología. En la microóptica el posicionamiento biaxial de chips microópticos, microlentes y prismas para la formación y deflexión del haz de luz son de especial interés. Igualmente en la microbiología el movimiento de microherramientas para la manipulación de células biológicas y microorganismos genera un adecuado campo de acción (FRANK, 1998).

Los sistemas de microposicionamiento se pueden basar en diferentes tipos de materiales y modos de actuación. Si es necesario para el sistema un tamaño pequeño, fuerzas bajas, y alta frecuencia; actuadores electrostáticos son una buena opción. Sin embargo, son capaces de producir sólo una gama limitada de desplazamientos con un alto voltaje. Para aplicaciones de baja tensión, actuadores térmicos, así como actuadores magnéticos son ampliamente utilizados (JUUTI, y otros, 2008).

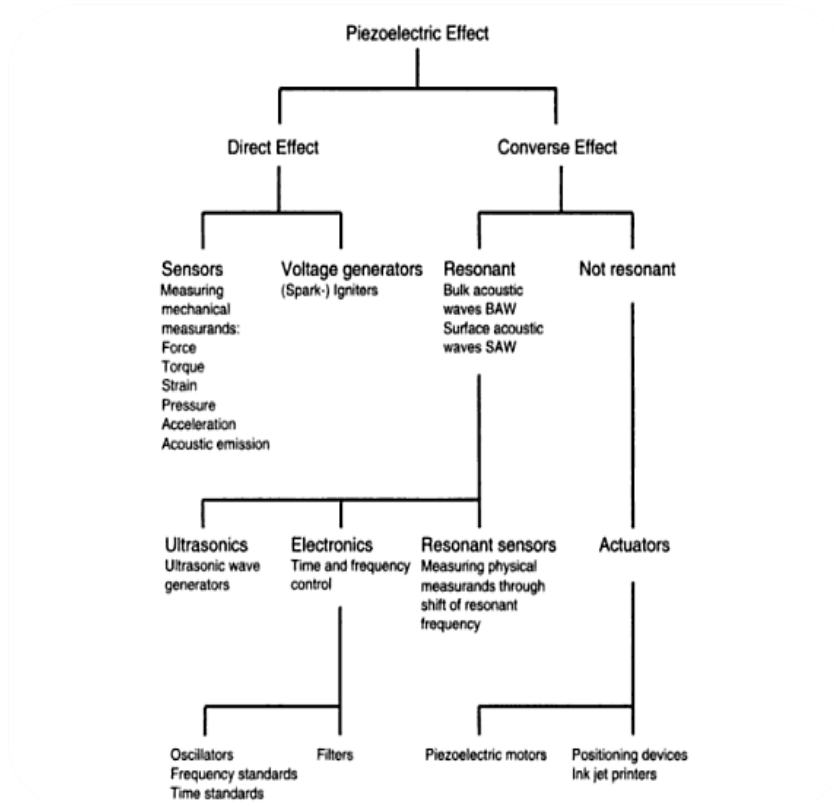
Los actuadores térmicos son generalmente comparables en tamaño a los electrostáticos, pero también ofrecen una gama limitada de movimiento que por lo general tiene que ser amplificada mecánicamente. En cambio, los actuadores magnéticos y magnetostrictivos proporcionan desplazamientos relativamente grandes, pero requieren el uso de bobinas para generar el campo magnético y, por tanto, pueden ser voluminosos y costosos. Además, estos se basan en la corriente y, por tanto, consumen energía mientras mantiene una posición estática (JUUTI, y otros, 2008).

3.3.1. Piezoeléctricos

La piezoelectricidad es entendida como la interacción electromecánica entre el estado mecánico y eléctrico en un cristal sin centro de simetría. El efecto piezoeléctrico directo se presenta cuando una deformación mecánica del material piezoeléctrico produce un cambio proporcional en la polarización eléctrica del material, es decir, aparece una carga eléctrica en determinadas caras del material cuando es sometido a cargas mecánicas. El efecto piezoeléctrico inverso significa que un esfuerzo mecánico proporcional a un campo eléctrico externo es inducido en el material, es decir, el material se deforma cuando un voltaje eléctrico es aplicado (GAUTSCHI, 2002).

Las principales aplicaciones de los materiales piezoeléctricos se presentan en la ilustración 11.

Ilustración 11. Aplicaciones del efecto piezoeléctrico



(GAUTSCHI, 2002)

La miniaturización y alta precisión son importantes tendencias en la industria moderna. Estas tendencias han incrementado la demanda de actuadores de posicionamiento cada vez más precisos. Los actuadores piezoeléctricos poseen numerosas ventajas para este tipo de dispositivos, tales como una alta resolución hasta la escala sub-nanométrica, una estructura simple, tamaño pequeño, una gran libertad al momento de diseñar el dispositivo, entre otras (SEOK RHO, y otros 2008). Sin embargo, el comportamiento real de los piezoeléctricos es más complicado de lo que se espera en condiciones ideales, lo que genera una brecha entre el aspecto teórico y el experimental. Esto es debido al deslizamiento que ocurre como resultado de la diferencia de fuerzas en el sistema (SEOK RHO, y otros 2008).

Adicional al deslizamiento, existe otra circunstancia que hace que la condición de trabajo sea más complicada pues agranda la diferencia entre el comportamiento teórico de los piezoeléctricos y su desempeño real. Esta es la diferencia entre el desplazamiento electromagnético hacia adelante y el desplazamiento electromagnético de retroceso, debido a los efectos de forma, el material, la frecuencia de operación, entre otros. (SEOK RHO, y otros, 2008)

3.3.2. Motor DC

Un motor de DC con escobillas esencialmente consta de un rotor situado en un campo magnético, lo que provoca la rotación cuando la corriente se aplica a los bobinados del motor. La velocidad de rotación es proporcional al voltaje aplicado, mientras que el torque es proporcional a la corriente. Los motores DC se caracterizan por su movimiento suave y de alta velocidad. Estos motores también proporcionan una buena eficiencia y una alta relación potencia / peso. A diferencia de los motores de pasos, los motores DC no ejercen torque cuando están inactivos (NEWPORT CORPORATION@a, 2009).

3.3.3. Motor paso a paso

Un motor de paso funciona con el principio básico de la atracción y repulsión magnética. Estos motores convierten los pulsos digitales en el movimiento del eje de rotación. La rotación es directamente proporcional al número de entrada de pulsos generados, y la velocidad es proporcional a la frecuencia de los pulsos. La mayoría de los motores de pasos con alta precisión utilizados en la actualidad son los llamados motores híbridos. Consisten en un estator laminado y dentado con bobinas unidas a los dientes del estator y conectados entre sí de dos en dos. El rotor es un multi-polo de

imán permanente. La dinamización de las bobinas de motor, genera el par necesario para girar el motor paso a paso (NEWPORT CORPORATION@b, 2009).

Los motores de pasos o motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas (SOTO, 2005). El estado en el cual el motor queda enclavado asegura que el resto del sistema no se moverá, por lo cual es el estado en el cual se mantiene el motor mientras no se encuentre en movimiento.

4. ALCANCE DEL PROYECTO

Al finalizar el proyecto, se pretende obtener los siguientes resultados tangibles:

- 1) Una recopilación de información (Estado del Arte) además de referenciar y sustentar el desarrollo del proyecto, para que sirva como soporte a futuros investigadores.
- 2) Un modelo de diseño y control para los componentes del sistema de microposicionamiento.
- 3) Verificar el comportamiento de los modelos de diseño y control mediante experimentos
- 4) Entregar el modelo funcional.
- 5) Un informe final que incluya los protocolos de usuario y mantenimiento para un primer prototipo, para futuros desarrollos de proyectos relacionados con el tema.

5. METODOLOGÍA SUGERIDA.

El trabajo gira en torno a la consecución de cada uno de los objetivos propuestos para lo cual debe dividirse en diferentes etapas

5.1. Etapa 1: revisión bibliográfica

En esta etapa se realiza una revisión y recopilación de la información pertinente con el desarrollo del proyecto, por medio de la cual se establece el estado del arte y se sustenta el desarrollo del proyecto desde un punto de vista bibliográfico.

5.2. Etapa 2: definición de variables y elementos de control

Una vez establecidos los parámetros de desarrollo del proyecto, este debe acotarse de acuerdo al alcance que se espera obtener en el mismo. En este punto se obtiene un diseño inicial mediante el cual se abarquen las necesidades de diseño.

5.3. Etapa 3: diseño e implementación de experimentos

Etapa de diseño e implementación de la mesa puesta en marcha, al igual que la verificación mediante algún tipo de referencia de la precisión de las medidas desarrolladas por la misma. Esta es la etapa de construcción y/o adaptación de la mesa y sus componentes. Una vez construidos y/o adaptados todos los dispositivos necesarios, se procede a realizar el control sobre los mismos de manera semiautomática.

5.4. Etapa 4: documentación

Esta etapa va en paralelo a las demás, ya que desde la etapa 1 hasta la etapa 3 se documenta todo el proceso de diseño, fabricación y control. Dentro de esta etapa se incluyen los informes de avance al igual que un protocolo de usuario y uno de mantenimiento.

6. DISEÑO CONCEPTUAL

Para realizar el análisis del diseño del objeto se emplearon los métodos proporcionados por el diseño conceptual y el diseño metódico, basándose en sus herramientas con el fin de alcanzar un esquema óptimo.

A partir de las teorías y principios de los autores Phal y Beitz (PAHL, y otros, 2007) la metodología del diseño adoptada inicialmente toma una perspectiva global mediante la cual el problema es abordado como un conjunto, en donde, a medida que se avanza en las etapas se profundice cada vez más en el desarrollo de las soluciones requeridas.

Sin embargo, a medida que el proyecto avanza, cabe la posibilidad de variar el método, ya que la estrategia de diseño empleada debe responder de manera adecuada al problema y a la situación particular.

6.1. Especificaciones de diseño del producto

El punto de partida para el diseño, instrumentación y caracterización de la plataforma XY, se encuentra acotado por las necesidades y requerimientos del laboratorio de física y microingeniería, su infraestructura y su poder adquisitivo a partir de los cuales pueden generarse las necesidades para la consecución de los objetivos.

Para esto, se establecen las necesidades concretas a cumplir por parte del sistema, su importancia, clasificación y cuantificación, siendo estas características las fronteras que delimitan al diseño y desarrollo del proyecto.

Estas conclusiones se presentan en la Tabla 1, la cual indica según cada categoría si es considerada como demanda (D) o deseo (d). Las demandas denotan los requerimientos que deben ser cumplidos de manera obligatoria durante el diseño del

objeto; de otro lado, el deseo denota los requerimientos que se quisieran cumplir en la medida de las posibilidades técnicas y económicas al alcance.

Tabla 1. PDS

ELEMENTO	DEMANDA / DESEO (D) (d)		REQUERIMIENTO
DESARROLLO	D	El producto debe estar terminado a final del semestre académico 2009-1	Duración del proyecto: 5 meses
			Entrega final: Mayo 08 /2009
	D	Que funcione con energía eléctrica	110 voltios / 50 – 60 Hz
	D	Debe usarse una plataforma plana sobre la cual se pone el objeto a desplazar	Mesa con desplazamiento X-Y serie SG-462M Newport®.
	d	Que el producto tenga adecuada interfaz con el usuario	Botones de mando y pantalla
	d	Tiene desplazamiento de dos grados de libertad	Desplazamiento en eje X y eje Y
	d	El desplazamiento de cada grado de libertad debe ser independiente uno del otro	Desplazamiento en X independiente de desplazamiento en Y
	D	El sistema cuenta con una posición de referencia	El sistema debe ubicarse en una posición denominada (0,0) relativa a cada eje
	D	El sistema realiza figuras simples de forma automática	El sistema realiza Líneas y/o Cuadrados
	D	El sistema tiene un tamaño suficiente para realizar el desplazamiento	Tamaño de la plataforma 100 veces mayor al tamaño del paso mínimo en cada eje
	D	El tamaño de las formas simples está por encima de la resolución del sistema	Líneas y/o cuadrados de lado mínimo 5um
		d	Debe moverse de forma automática según el usuario lo indique

	D	Que el paso mínimo sea micrométrico	Paso mínimo del sistema de 5um
	D	Fácil operación	Instrucciones y protocolos para los usuarios
	d	Que pueda corroborarse que los desplazamientos realizados son los que indica el sistema	Desplazamiento de 5um ± 2.5um Mínimo 2 sistemas de localización de posición del dispositivo
CALIDAD Y CONFIABILIDAD	d	Que cumpla con los estándares de calidad existentes en el mercado	Normas ISO 9000
	D	Que funcione bien durante mucho tiempo	Tiempo de vida media 480h
ERGONOMÍA	d	Que las funciones sean fácilmente identificables	Utilización de códigos de color para los botones
			Utilización de símbolos universales
			Pantalla ubicada en posición ergonómica
PESO	d	Que no se requiera mucho esfuerzo para transportarlo	Peso máximo 7 Kg
DOCUMENTACIÓN	D	Que se suministre toda la información necesaria para utilizarlo correctamente	Manual de usuario con: Descripción del producto Instrucciones de uso Advertencias de seguridad
			Manual de mantenimiento
MATERIALES	D	Los materiales de agarre no deben ser conductores de calor ni electricidad	Utilización de: Polímeros: Nomex, TFE,PBT, Nylon, Hy- trel, NBR, ABS
	d	Que el usuario no afecte electrostáticamente el producto	Sistema electrónico aislado
	D	Los materiales deben ser resistentes a la corrosión	Materiales anticorrosivos
FACILIDADES DE MANUFACTURA	D	Que sea posible de construir en las instalaciones de la Universidad EAFIT	Utilización de los talleres de: modelos, prototipos, moldes, maquinas y herramientas, soldadura y mecatrónica.

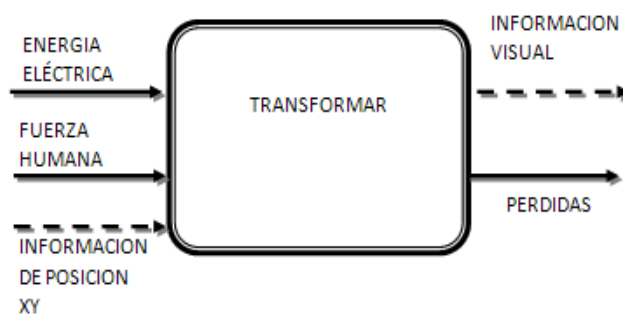
COSTO	d	Que el precio de construcción no exceda el tope especificado por la universidad	Precio máximo: \$ 1'000.000 COP
PARTES ESTANDAR	D	Que las partes del sistema se puedan reemplazar fácilmente	Mínimo 60% de partes estándar

6.2. Caja negra

La caja negra muestra los flujos de entrada y salida del sistema, por medio de los cuales puede obtenerse la función principal del sistema.

La función principal del dispositivo de posicionamiento es generar movimientos a lo largo de sus 2 ejes (eje X, eje Y) de una manera controlada a partir de la energía eléctrica de entrada (Ilustración 12).

Ilustración 12. Caja Negra

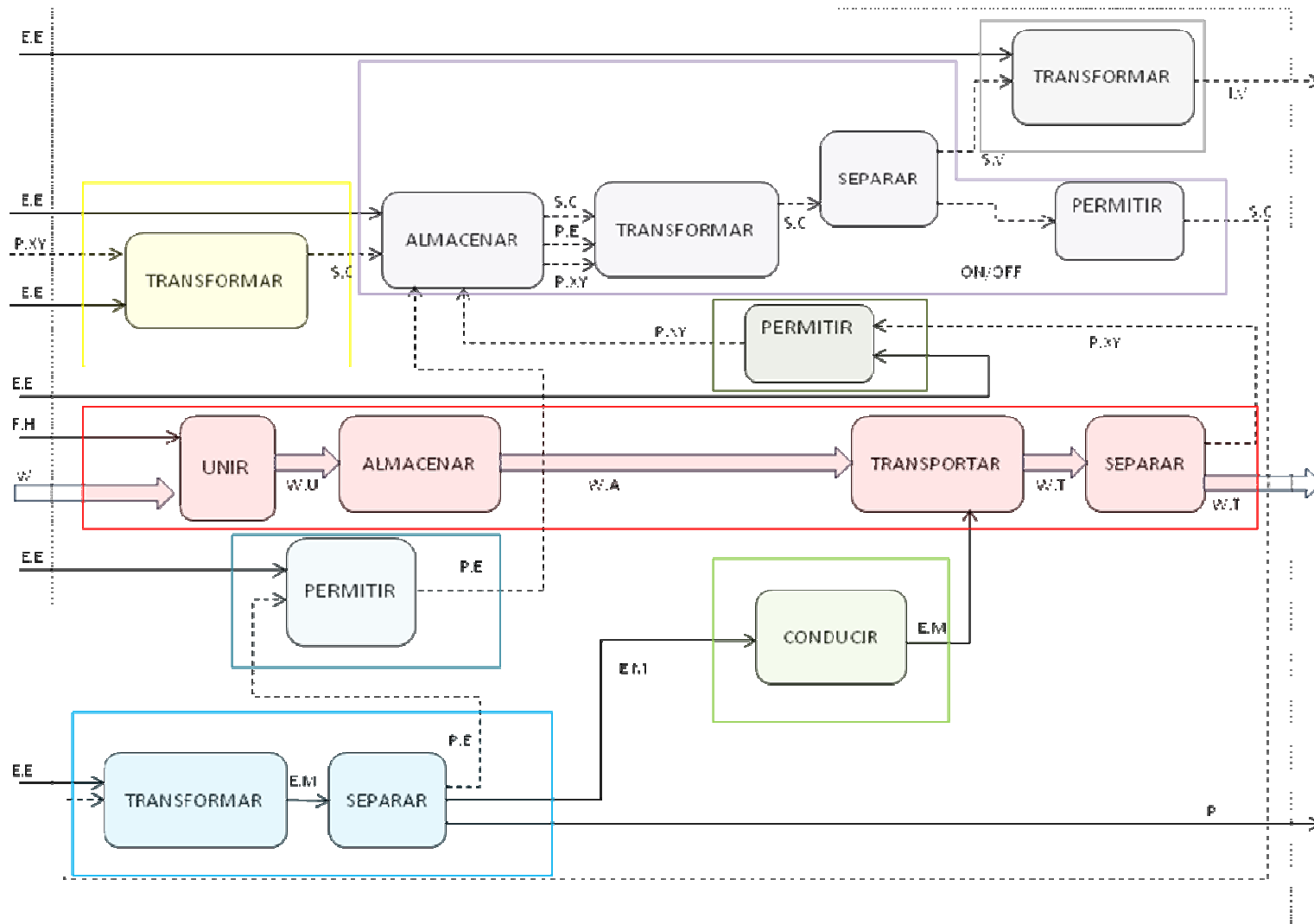


6.3. Estructura funcional

En la estructura funcional se pueden observar cada una de las relaciones entre los elementos que componen al sistema y la forma cómo interactúan entre sí, cada uno cumpliendo una función específica (CORREA CASTAÑO, 2007).





A pesar de que en la estructura se incluye el sustrato (oblea) el trabajo no plantea emplearla, sin embargo, como el sistema se encuentra orientado a la continuación de un proyecto más general que el posicionamiento de la mesa XY, debe tenerse en cuenta la función a cumplir en un futuro, la cual será transportar la oblea.

Ilustración 14. Diagrama de Funciones



E.E=ENERGIA ELECTRICA
E.M=ENERGIA MECANICA
W=WAFER
W.U=WAFER UBICADO
W.A=WAFER ALMACENADO
W.T=WAFER TRANSPORTADO
P.E=POSICION EXTREMO
P.XY=POSICION XY
S.C=SEÑAL DE CONTROL
S.V=SEÑAL VISUAL
P=PERDIDAS
ON/OFF=SEÑAL ENCENDIDO/APAGADO
LV=INFORMACION VISUAL

 HARDWARE DE CONTROL
 HARDWARE -SOFTWARE
DE CONTROL
 SENSOR DE REFERENCIA
 PLATAFORMA

 ACTUADOR
 SENSOR
 MECANISMO
 INTERFAC DE USUARIO

6.4. Matriz morfológica

Una vez definidas las diferentes funciones que conforman el sistema se procede a plantear posibles soluciones en busca de obtener un adecuado desempeño y un total cumplimiento de la función principal (Tabla 2). Posibles soluciones para las diferentes funciones se presentan a continuación.

Tabla 2 Matriz Morfológica

INTERFAZ CON EL USUARIO	Pantalla PLC	Display 7 segmentos	LCD	Pantalla de computador
HARDWARE/SOFTWARE DE CONTROL	PLC	Microcontrolador		computador
HARDWARE DE CONTROL	Joystick	Teclado		Switches
SENSOR DE REFERENCIA	Interferómetro	sensor de Efecto hall	Microswitch	micrómetro
SENSOR	encoder lineal	sensor de Efecto hall	encoder circular	galgas extenso métricas
PLATAFORMA	Mesa X-Y Newport 462			
MECANISMO	Mecanismo 3DOF	Tornillo micrométrico	Articulaciones flexibles	Mecanismo Scott-Rusell
ACTUADOR	Motor paso a paso	Motor DC	Actuador hidráulico	Actuador Piezoeléctrico

Tabla 3. Principios de solución de la Matriz Morfológica

Principios de solución	
Principio solución	comentario
Display 7 segmentos	7 LEDs (Diodos emisores de luz),
Display LCD	Pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora. A menudo se utiliza en dispositivos electrónicos de pilas, ya que utiliza cantidades muy pequeñas de energía eléctrica.
Computador	Genera elevados costos en el proyecto. Trae consigo la posibilidad de reducir la cantidad de circuitos en el montaje. Brinda la posibilidad de empalmar el sistema a un software ya existente
PLC (Controlador lógico programable)	Equipo electrónico que permite el control de elementos industriales. Permite la programación y coordinación de varios sistemas al mismo tiempo. No requiere de más sistemas electrónicos o interfaces anexas para el control de los actuadores. Permite una eficaz programación, puesta en marcha y es de un funcionamiento muy confiable. Requiere de una alta inversión para la adquisición del equipo
Microcontrolador	Cuentan con la capacidad suficiente de controlar todas las variables en el sistema. Los microcontroladores son una buena opción, como interfase entre el software del computador y el sistema de actuadores. Permite ser programado para generar señales y ser controladas por sí mismo o desde el Computador. Estos elementos presentan unos costos bajos en comparación a las otras soluciones
Joystick	Palanca de mando de control de dos ejes. Muy utilizado en ambientes industriales y computadores. Compatible especialmente con los computadores.
Teclado	Periférico que consiste en un sistema de teclas. Permite introducir datos a un ordenador o dispositivo digital. Muy versátiles en cuanto a su uso y variedad
Switches	Dispositivo analógico de lógica de interconexión Posee dos posibles estados. Sistema más básico y sencillo de todos.
Interferómetro	El interferómetro de Michelson permite medir distancias con una precisión muy alta. Su funcionamiento se basa en la división de un haz coherente de luz en dos haces para que recorran caminos diferentes y luego converjan nuevamente en un punto. Necesita gran estabilidad y rigidez pues se desalinea con

	<p>gran facilidad. Requiere de una elevada precisión en el resto del sistema. Su construcción demanda de mucho tiempo para su alineación y medidas.</p>
Sensor Efecto Hall	<p>Se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes o para la determinación de la posición.</p>
Encoder	<p>Dispositivo electromecánico, que convierte la posición angular o lineal en una señal digital eléctrica. Conectado a la electrónica adecuada y a través de los apropiados vínculos mecánicos, permite medir desplazamientos angulares, movimientos lineales y circulares, y velocidades rotacionales y aceleraciones. Varias técnicas pueden ser utilizadas para la detección de un movimiento angular: capacitiva, inductiva, potenciométrica y fotoeléctrica.</p>
Microswitch	<p>Posee el mismo principio de acción que los switches convencionales, sin embargo, su tamaño le permite ser empleado en sistemas donde el espacio es reducido.</p>
Micrómetro	<p>Son utilizados cuando se necesita un posicionamiento preciso y que pueda llevarse a cabo en repetidas ocasiones. Generalmente pueden permitir lecturas de hasta 1um de resolución.</p>
Articulaciones flexibles	<p>Son libres de desgaste y se pueden hacer como un elemento monolítico. Si las curvas de fuerza-desplazamiento son conocidas, entonces todos los desplazamientos que sean continuos en todos los rangos pueden ser calculados a partir de la fuerza externa. Tienen una serie limitada de movimientos. Son muy difíciles de elaborar a escala micrométrica.</p>
Mecanismo 3 Grados de Libertad	<p>Permite la traslación a lo largo del plano XY y la rotación en el eje Z. Este tipo de microposicionadores es usado generalmente en procesos que requieren movimientos rotacionales.</p>
Mecanismo Scott-Rusell	<p>No poseen reacción de retroceso, fricción insignificante, no necesita lubricación, libre de generación térmica. Puede ser fabricado monolíticamente para reducir los errores de montaje y la garantía de precisión de mecanizado.</p>
Tornillo micrométrico	<p>Tronillos micrométricos de alta precisión. Es el sistema más sencillo. Muy utilizado en sistemas que no requieran una precisión más allá de las micras.</p>
Motores paso a paso	<p>Elemento electrónico que permite el control en el giro del eje grado a grado. El costo es muy similar al costo de los servomotores.</p>
Motores DC	<p>Se encuentran en tamaños pequeños aptos para la necesidad requerida. Pueden ser controlados en dos direcciones con rangos de torque importantes.</p>

	<p>En este tipo de sistemas se recomienda usar un sistema de reducción para aumentar la carga de trabajo del motor y lograr mayor precisión en el giro.</p> <p>Por si solos no pueden ser controlada su posición, requiriendo de un sistema anexo (Encoder) para controlar el giro del eje y lograr una posición en especial.</p> <p>Su costo es aceptable y se encuentra en el mercado nacional.</p>
Actuador Piezoeléctrico	<p>Disponibles hace pocos años.</p> <p>Son de gran precisión y difíciles de calibrar.</p> <p>Poseen gran histéresis por lo que se dificulta su utilización.</p>
Actuador hidráulico	<p>Se emplean cuando lo que se necesita es potencia, poseen gran fuerza pero poca precisión.</p> <p>Muy accequibles pero son de gran tamaño.</p>

6.5. Alternativas de solución

Una vez obtenidos los principios de solución a partir de la matriz morfológica, son evaluados desde el punto de vista técnico y económico, basado en una calificación cuantitativa con la que se espera obtener el diseño más viable y efectivo.

Tabla 4. Alternativa de Solución 1

INTERFAZ CON EL USUARIO	Pantalla PLC	Display 7 segmentos	LCD	Pantalla de computador
HARDWARE/SOFTWARE DE CONTROL	PLC	Microcontrolador		computador
HARDWARE DE CONTROL	Joystick	Teclado		Switches
SENSOR DE REFERENCIA	Interferómetro	sensor de Efecto hall	Microswitch	micrómetro
SENSOR	encoder lineal	sensor de Efecto hall	encoder circular	galgas extenso métricas
PLATAFORMA	Mesa X-Y Newport 462			
MECANISMO	Mecanismo 3DOF	Tornillo micrométrico	Articulaciones flexibles	Mecanismo Scott-Rusell
ACTUADOR	Motor paso a paso	Motor DC	Actuador hidráulico	Actuador Piezoeléctrico

Tabla 5. Alternativa de Solución 2

INTERFAZ CON EL USUARIO	Pantalla PLC	Display 7 segmentos	LCD	Pantalla de computador
HARDWARE/SOFTWARE DE CONTROL	PLC	Microcontrolador		computador
HARDWARE DE CONTROL	Joystick	Teclado		Switches
SENSOR DE REFERENCIA	Interferómetro	sensor de Efecto hall	Microswitch	micrómetro
SENSOR	encoder lineal	sensor de Efecto hall	encoder circular	galgas extenso métricas
PLATAFORMA	Mesa X-Y Newport 462			
MECANISMO	Mecanismo 3DOF	Tornillo micrométrico	Articulaciones flexibles	Mecanismo Scott-Rusell
ACTUADOR	Motor paso a paso	Motor DC	Actuador hidráulico	Actuador Piezoeléctrico

Tabla 6. Alternativa de Solución 3

INTERFAZ CON EL USUARIO	Pantalla PLC	Display 7 segmentos	LCD	Pantalla de computador
HARDWARE/SOFTWARE DE CONTROL	PLC	Microcontrolador		computador
HARDWARE DE CONTROL	Joystick	Teclado		Switches
SENSOR DE REFERENCIA	Interferómetro	sensor de Efecto hall	Microswitch	micrómetro
SENSOR	encoder lineal	sensor de Efecto hall	encoder circular	galgas extenso métricas
PLATAFORMA	Mesa X-Y Newport 462			
MECANISMO	Mecanismo 3DOF	Tornillo micrométrico	Articulaciones flexibles	Mecanismo Scott-Rusell
ACTUADOR	Motor paso a paso	Motor DC	Actuador hidráulico	Actuador Piezoeléctrico

Tabla 7. Alternativa de Solución 4

INTERFAZ CON EL USUARIO	Pantalla PLC	Display 7 segmentos	LCD	Pantalla de computador
HARDWARE/SOFTWARE DE CONTROL	PLC	Microcontrolador		computador
HARDWARE DE CONTROL	Joystick	Teclado		Switches
SENSOR DE REFERENCIA	Interferómetro	sensor de Efecto hall	Microswitch	micrómetro
SENSOR	encoder lineal	sensor de Efecto hall	encoder circular	galgas extenso métricas
PLATAFORMA	Mesa X-Y Newport 462			
MECANISMO	Mecanismo 3DOF	Tornillo micrométrico	Articulaciones flexibles	Mecanismo Scott-Rusell
ACTUADOR	Motor paso a paso	Motor DC	Actuador hidráulico	Actuador Piezoeléctrico

6.6. Evaluación de alternativas de solución

Con el fin de dar una calificación cuantitativa a las alternativas con base en las especificaciones de diseño; los parámetros mediante los cuales las alternativas son evaluadas fueron jerarquizados por su importancia con valores de uno (1) a cinco (5) siendo cinco el mejor y uno el peor.

Tabla 8. Importancia de los Parámetros

Parámetro	Importancia
Duración de 5 meses	5
Funciona con Energía Eléctrica	4
Fácil Interfaz con el Usuario	3
Mínimo 2 Grados de Libertad	4
Desplazamiento independiente en cada Eje	4
Fácil ubicación en el punto (0,0)	5
Realiza Rayas	4
Rayas de mínimo 2um	3
Posee modo automático	4
Vida media 480h	3
Materiales anticorrosivos	4
Costo máximo \$1'000.000 pesos	5

A partir de la calificación sobre los criterios de evaluación, se procede a realizar la evaluación de cada una de las alternativas de solución (Tabla 9)

Tabla 9. Evaluación de alternativas de Solución

Parámetro	Importancia	solución 1	solución 2	solución 3	solución 4
Duración de 5 meses	5	3	1	2	4
Funciona con Energía Eléctrica	4	5	5	5	5
Fácil Interfaz con el Usuario	3	3	5	4	3
Mínimo 2 Grados de Libertad	4	5	5	5	5
Desplazamiento independiente en cada Eje	4	5	5	5	5
Fácil ubicación en el punto (0,0)	5	2	3	4	3
Realiza Líneas	4	5	3	5	5
Líneas de mínimo 5um	3	2	2	4	4
Posee modo automático	4	5	5	5	5
Vida media 480h	3	4	2	5	4
Materiales anticorrosivos	4	5	3	5	5
Costo máximo \$1'000.000 pesos	5	4	2	1	5
TOTAL		192	161	194	213

Al realizar esta evaluación, se encontró que para algunas funciones más de una alternativa de solución podría llevarla a cabo de manera satisfactoria, mientras que para otro tipo de funciones, las opciones se encuentran limitadas por diversos factores. Por esta razón, se optó por realizar una nueva evaluación más detallada mediante la cual se determinase la alternativa de solución a utilizar.

Para esto, inicialmente se definieron las funciones que en principio sólo poseen una alternativa adecuada para el proyecto, estas son:

- **Hardware/Software De Control:** tanto el PLC como el Computador son herramientas muy potentes que se encuentran por encima del nivel técnico y económico requerido para el proyecto, por lo tanto el empleo de microcontroladores se considera como la posibilidad a emplearse.
- **Interfaz con Usuario:** en función de la decisión anterior, tanto la pantalla de PLC como la pantalla de Computador quedan descartadas para la solución de esta función. El display de 7 segmentos limita en gran medida el uso de caracteres diferentes a los números, por lo tanto no es una opción que satisfaga las necesidades. De este modo, una pantalla de cristal líquido (LCD) de matriz de puntos será empleada como interfaz del sistema con el usuario, ya que permite el uso de caracteres alfanuméricos con gran facilidad.
- **Plataforma:** La plataforma XY empleada es la Mesa XY Newport 462 debido a un requerimiento impuesto por parte del laboratorio.
- **Mecanismo:** A pesar de ser el sistema más sencillo es un sistema que responde a las necesidades de resolución (5 μ m) y por contarse previamente con este tipo de tornillos en el laboratorio, este será el mecanismo a emplearse en este proyecto.
- **Hardware De Control:** Por su elevada versatilidad y gran variedad de teclados en el mercado actual, se empleará un teclado por medio del cual el usuario pueda ingresar información al sistema.
- **Sensores:** Se ha considerado que existen 4 tipos de sensores que podrían ser utilizados en el proyecto:

- Sensor de Efecto Hall
- Encoder
- Microswitch
- Micrómetro.

Sin embargo, de acuerdo con lo que se dispone en el laboratorio y después de realizar una revisión bibliográfica, se ha elegido utilizar un encoder circular como sensor principal y un sensor de efecto hall como sensor de referencia.

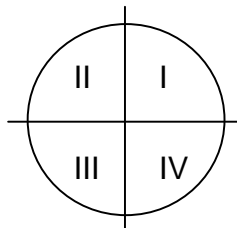
- Actuador: luego de la evaluación técnico-económica, tanto el motor DC como el motor paso a paso, pueden llevar a cabo la función de actuador en el sistema, sin embargo, por las mismas razones que se eligieron los sensores se ha elegido como actuador un motor paso a paso.

7. MATERIALES Y MÉTODO

Con el desarrollo del diseño conceptual del sistema se obtuvieron los criterios necesarios para la toma de decisiones acerca de los componentes y características más generales que el sistema de posicionamiento XY debe presentar.

El punto de referencia (0,0) del sistema es definido como el punto medio de la mesa, esto debido a que los sustratos generalmente utilizados en procesos de micro fabricación son de geometría circular, sin embargo, no todos poseen las mismas dimensiones, por lo que se busca que el punto (0,0) coincida con el centro de estos sustratos y pueda trabajarse con ellos de una manera sencilla en los cuatro cuadrantes a partir del punto medio, como se muestra en la Ilustración 15.

Ilustración 15. Cuadrantes para la Oblea de Silicio



Con el fin de ejecutar y controlar los movimientos de la mesa con referencia al punto (0,0) se emplearon los siguientes materiales y métodos.

7.1. Plataforma X-Y

La plataforma empleada es una mesa integrada de precisión con rodamientos lineales cruzados en dos ejes (x, y) Newport SG-462-XY-M. Construida en acero inoxidable con rodamientos en acero endurecido. Las superficies de los rodamientos cruzados proporcionan viajes excepcionalmente lineales con desviaciones angulares menores de 100 μ rad sobre cualquier eje. Esta posee un diseño especial para el montaje de

actuadores para cualquier eje en cualquier momento (NEWPORT CORPORATION@a, 2009).

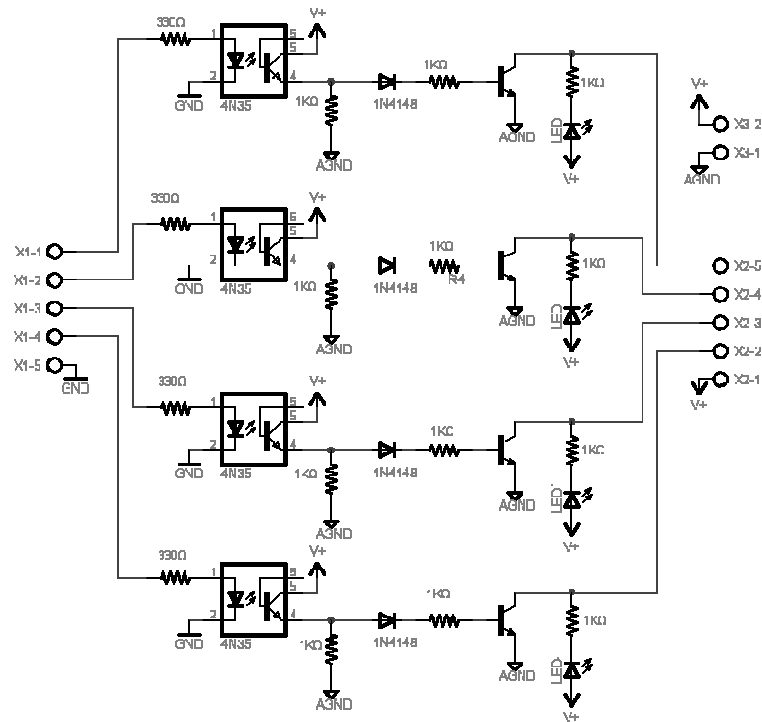
7.2. Actuador

Los motores deben permitir un control preciso de las posiciones del sistema y deben presentar una estabilidad suficiente para evitar vibraciones o movimientos no deseados. Deben estar además en capacidad de generar una fuerza que transmitida por los acoples sea capaz de generar los movimiento de desplazamiento de la mesa, venciendo la inercia del mecanismo y la fuerza ejercida por los resortes.

Inicialmente como sistema actuador se emplearon motores paso a paso. Los motores utilizados inicialmente en el proyecto son motores disponibles para el laboratorio, sin embargo éste no cuenta con referencias o una ficha técnica del mismo. El motor está controlado por medio de señales lógicas enviadas desde el microcontrolador de manera que realiza desplazamientos discretos.

Los motores de paso se implementaron por intermedio de un controlador que permite el control adecuado de los mismos por parte del microcontrolador. El esquema del circuito se presenta en la Ilustración 16

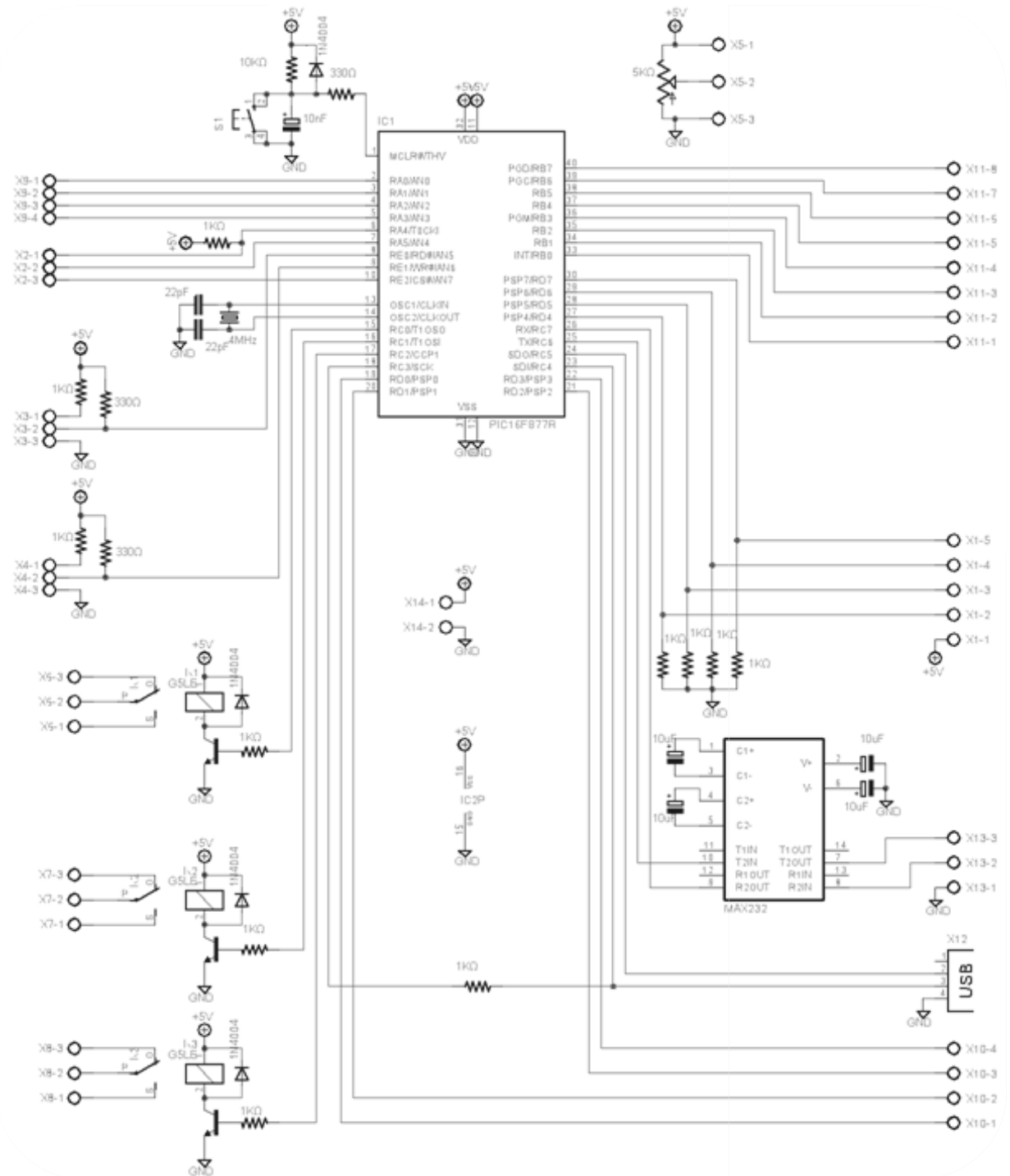
Ilustración 16. Circuito para motores paso a paso



En donde todos los terminales X1 corresponden a las entradas al microcontrolador, las X2 corresponden a las salidas hacia los motores y X3 corresponden a la alimentación.

Adicional a esto, para el uso de motores de paso, la tarjeta electrónica del sistema se diseñó de la forma como se muestra en la Ilustración 17. Esta tarjeta posee diversas entradas y salidas destinadas para el momento en que el proyecto vaya creciendo, por este motivo, sólo se mencionaran las principales entradas y salidas del circuito para esta etapa.

Ilustración 17. Tarjeta electrónica para motores de paso



En donde los terminales X1 se encuentran destinados para microswitches, X2 son salidas o entradas libres, X3 y X4 para los Encoder, X6, X7 y X8 son contactos para relé, X9 y X10 son las salidas para el circuito de los motores de paso, X5 es para el contraste de la pantalla LCD y X11 se encuentra destinado para la conexión del teclado y la pantalla LCD, X12 es la conexión al puerto USB, X13 las salidas a puerto serial, finalmente X14 es la alimentación.

Los motores adquiridos actualmente son capaces de realizar 100 pasos por vuelta. Teniendo en cuenta que el tornillo micrométrico utilizado se desplaza 500um por vuelta puede considerarse que el avance en micras por cada paso es

Ecuación 9. Avance por paso

$$Avance = \frac{500um}{100pasos} = \frac{5um}{paso}$$

Siendo esta la resolución máxima que se puede esperar en el sistema.

Finalmente los motores de paso fueron reemplazados por motores DC como se detalla en el capítulo 8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS. sección 8.2 Motores.

7.3. Mecanismo

La coordenada (0,0) se define de manera conveniente como un punto en medio del recorrido del mecanismo empleado. En este caso, el empleado es un tornillo micrométrico Newport SM-25, con escala vernier con una sensibilidad máxima de 1um y 25mm de recorrido, para un paso equivalente de 500um por vuelta. Por lo tanto la coordenada (0,0) se encuentra en medio del recorrido del tornillo, es decir, en 12.5 mm. La precisión con la cual pueda ubicarse la mesa en la coordenada (0,0) depende

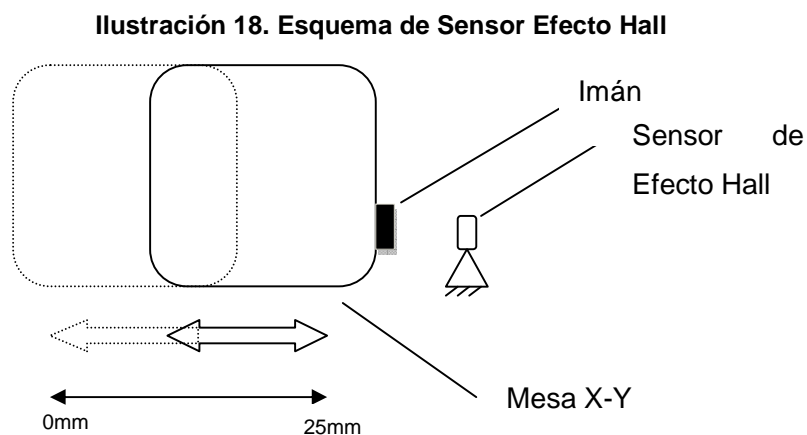
estrictamente del sensor de referencia que sea empleado para esto, independiente de la sensibilidad dada por el tornillo.

El tornillo es compatible con la mesa previamente mencionada y recomendado por la empresa como uno de los actuadores ideales para ella.

7.4. Sensor de referencia

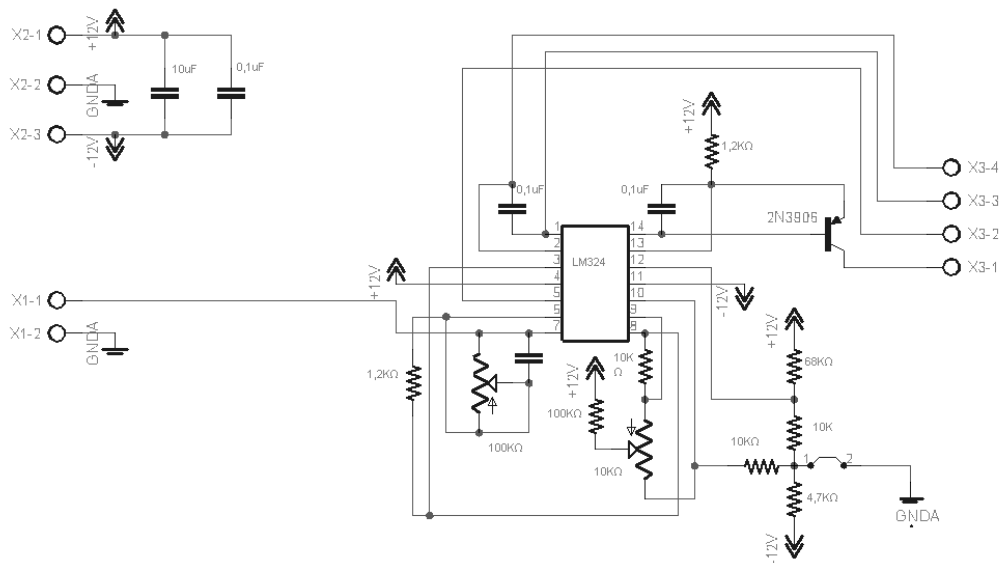
El sensor de referencia empleado en el sistema debe tener una tolerancia en las medidas de $\pm 25\mu\text{m}$ para la ubicación del punto inicial de posicionamiento, por lo tanto la estabilidad del sensor debe ser suficiente para asegurar esta tolerancia. A partir de esta característica se implementaron diferentes sistemas de sensado de referencia.

Con el fin de ubicar la mesa XY en la posición denominada (0,0), inicialmente se implementa un sensor de efecto Hall y un imán convencional asociado a él; el sensor de efecto hall se sujeta al soporte del acople del tornillo micrométrico y el imán se ubica en el borde de la mesa de frente al sensor, para generar movimiento relativo entre ellos, como se representa en la ilustración 18.



El sensor de efecto Hall empleado es el Toshiba THS119 que posee un voltaje de entrada de 12V, sin embargo, el voltaje de salida de este debe ser menor de 5V debido a que ésta es la magnitud máxima recibida por el microcontrolador, por esto se emplea un circuito acondicionador de señal mediante el cual los valores de salida del sensor de efecto Hall sean como máximo 5V (Ilustración 19) correspondiente al punto de cercanía más próximo entre el imán y el sensor, es decir, donde la ubicación del tornillo es 12500um en uno de sus ejes. De igual modo, para el punto -12500um el valor correspondiente al voltaje es 0V. En este intervalo de valores (-12500um, 12500um) es donde trabaja el sistema por lo tanto es necesaria una calibración del sensor de efecto hall en este intervalo tanto para el eje X como para el eje Y.

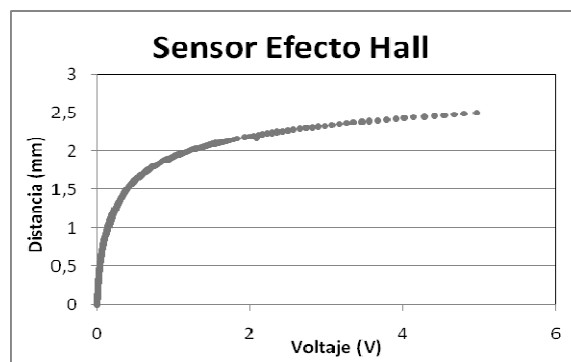
Ilustración 19. Circuito del sensor de Efecto Hall



En donde X1 corresponde a las salidas del circuito que van hacia el microcontrolador, X2 a la alimentación del mismo, y X3 corresponde a las conexiones del sensor de efecto hall.

Cada 10um se obtuvo el voltaje generado por el sensor de efecto Hall a lo largo del intervalo previamente mencionado (ver Ilustración 18) obteniéndose una curva de calibración mediante la cual se observa el comportamiento del sensor (ver Ilustración 20).

Ilustración 20. Calibración Sensor Efecto Hall 0-5V



Fialmente, los sensores de efecto Hall fueron descartados y en su lugar se emplearon microswitches tal como se explica en el capítulo 8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS Sección 8.1 Sensores.

7.5. Sensor principal

Como sensor principal es empleado un encoder circular que consta de un disco con franjas oscuras y transparentes diseñado en función del avance máximo del motor detectado por un arreglo de un foto emisor y un fototransistor que envían las señales adquiridas al microcontrolador para que éste a partir de las señales pueda ubicar correctamente al sistema de la manera deseada. Para el diseño del mismo se empleó la Ecuación 10.

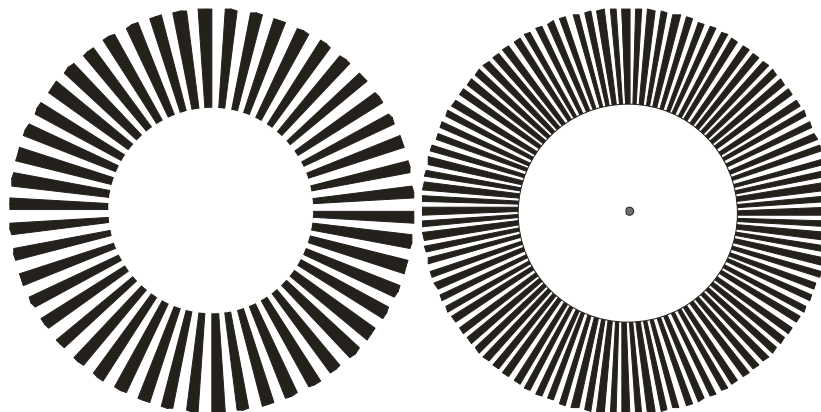
Ecuación 10. Ancho de línea de Encoder

$$\frac{\pi \times D}{\#Líneas} = \text{ancho línea}$$

En donde D es el diámetro del encoder, #líneas corresponde a la cantidad de líneas oscuras y transparentes que posee y el ancho corresponde al ancho de las líneas.

Se realizaron discos de 50 y de 100 líneas por vuelta (ver Ilustración 21) y de un solo bit; con el fin de evaluar cuál de ellos tiene un mejor desempeño. Para el encoder de 100 líneas, se realizan conteos por parte del microcontrolador cada vez que cambia de un estado a otro en una única dirección, es decir, la señal del encoder a interpretar por parte del microcontrolador será sólo de encendido a apagado o de apagado a encendido, pero no ambas. Sin embargo, cuando se realiza un encoder de 50 líneas por vuelta se espera que el conteo sea bidireccional, es decir, que detecte y almacene variaciones de encendido a apagado y viceversa.

Ilustración 21. a) encoder de 50 líneas. b) encoder de 100 líneas



La alineación de cada uno de estos encoder en los motores paso a paso requiere de gran precisión y exactitud, tornándose esto en un problema a la hora de calibrar el sistema. El motor paso a paso sólo genera movimientos discretos a medida que recorre cada uno de sus pasos, por lo cual, debe asegurarse que el punto medio de cada línea del encoder coincida de manera exacta con el punto en el que el motor genera un paso, de lo contrario, el encoder no estará alineado con el motor incurriendo así en la omisión

de algunos pasos del motor a lo largo de cada vuelta. Para esto, una posible solución que se planteó fue la de emplear una máscara por medio de la cual se facilitase la instalación del foto emisor de manera adecuada con respecto a las líneas del encoder.

Cuando se emplean motores de paso, la resolución del sistema está dada únicamente por la cantidad de pasos que estos puedan realizar en cada vuelta, sin embargo, cuando se emplean motores DC la resolución del sistema depende del desempeño del encoder, pues a mayor número de líneas detectadas por vuelta, mayor será la resolución del sistema. (Sobre esto se genera una discusión más amplia en el capítulo 8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS Sección 8.1 Sensores).

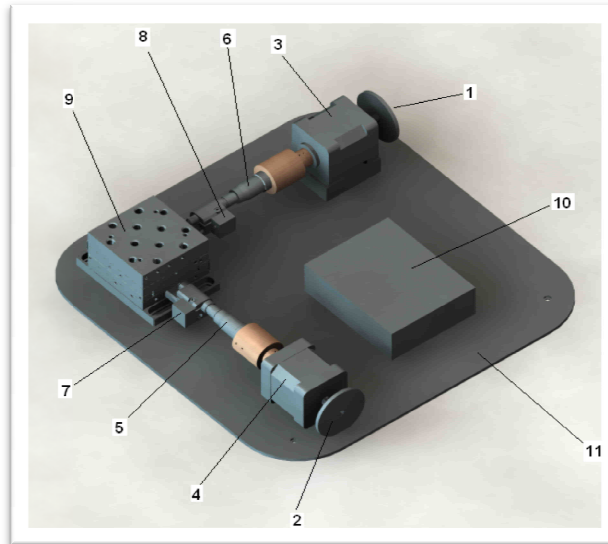
Las fuentes empleadas son fuentes comerciales conectadas a 110V AC con salidas de 5V y 24V DC suministradas por el laboratorio. La fuente de 5V es la alimentación para el microcontrolador, los foto emisores y foto receptores de los encoder, microswitches y la pantalla.

7.6. Proceso de construcción

Para la elaboración del equipo, tanto componentes mecánicos como electrónicos debieron ser acoplados en un solo sistema, sin embargo, con el fin de proteger los circuitos se optó por separar la fase de alimentación de los motores del microcontrolador, aunque permaneciesen juntos en el montaje final.

Una vez seleccionados todos los elementos principales se procede a realizar el ensamble de los componentes. En la Ilustración 22 se muestra una representación global del sistema de posicionamiento XY.

Ilustración 22. Representación del montaje mecánico del sistema de posicionamiento XY



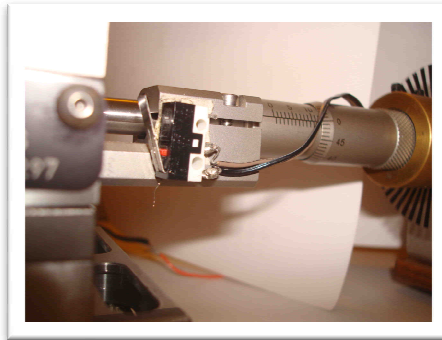
(JARAMILLO OCAMPO, y otros, 2008)

En donde:

- 1- Encoder para el motor en X
- 2- Encoder para el motor en Y
- 3- Motor en X
- 4- Motor en Y
- 5- Tornillo micrométrico Y (SM-25)
- 6- Tornillo micrométrico X (SM-25)
- 7- Microswitch para Y
- 8- Microswitch para X
- 9- Mesa Newport SG-462-XY-M
- 10-Representación de la caja de control electrónico
- 11-Soporte para el sistema

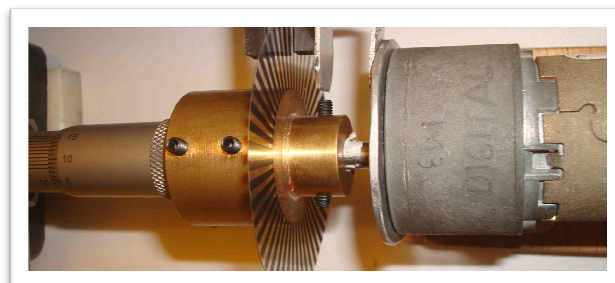
La mesa se encuentra unida a los tornillos micrométricos por medio de sujetadores diseñados especialmente para esta referencia de tornillo. A su vez, empotrados con respecto al movimiento de la mesa, se encuentran los microswitches, destinados a ubicar el punto (0,0) luego de los resultados obtenidos con los sensores de efecto Hall (ver capítulo de resultados), ubicados en un punto tal que cuando la mesa llegue al extremo de cada eje, el microswitch correspondiente a ese eje se active.

Ilustración 23. Ubicación de Microswitch



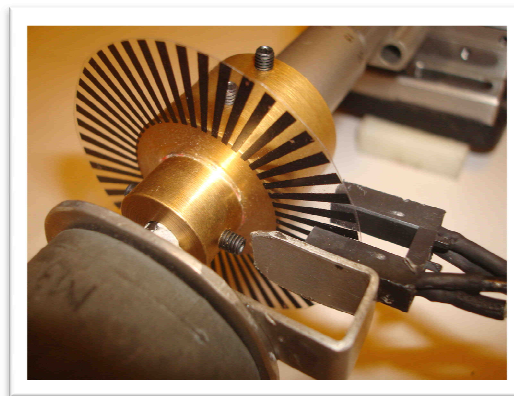
Los tornillos micrométricos se encuentran acoplados a los actuadores electromecánicos (motores) mediante un buje de bronce (Ilustración 24) debido a que ambos radios de los ejes correspondientes se encuentran en razón de 3:1.

Ilustración 24. Acople entre tornillo y motor



Los encoder se encuentran fijos sobre el eje de los motores, estos se construyeron mediante la impresión digital, la respuesta de dichos encoder fue satisfactoria para detectores ópticos de fácil adquisición los cuales se encuentran fijos a la estructura del motor, generando así un movimiento relativo entre el encoder y el detector.

Ilustración 25. Encoder y detector óptico



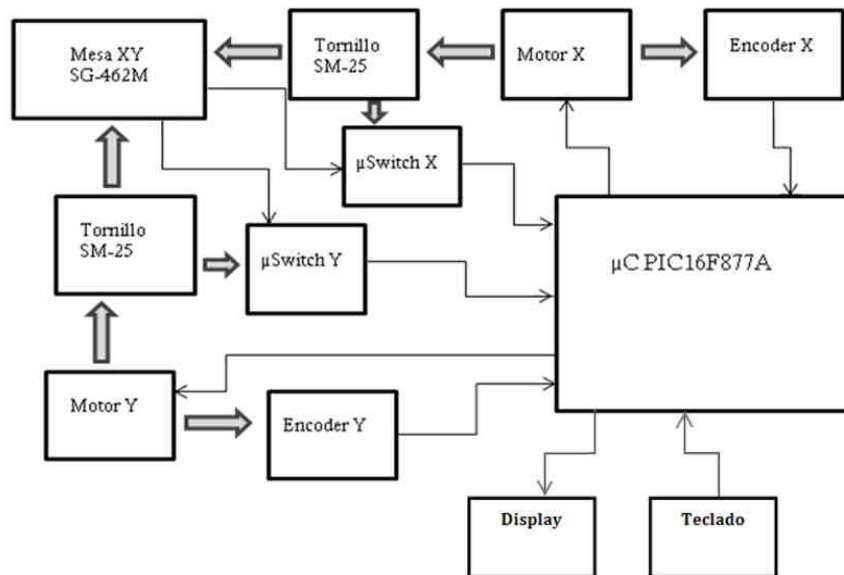
Los microswitch, los motores y los detectores ópticos se encuentran conectados a la caja de control electrónica. Finalmente todo el sistema se encuentra sobre un soporte para obtener estabilidad.

7.7. Sistema de control

El sistema de control de la mesa está compuesto por un software y un complemento electrónico. El software es el encargado de almacenar la información de la programación y generar las señales para lograr los movimientos deseados en ambos ejes de la mesa, y los componentes electrónicos permiten que las señales viajen hasta su destino y que se genere la potencia necesaria para el movimiento de los motores.

Una vista esquemática de la conexión entre componentes se muestra en la Ilustración 26.

Ilustración 26. Esquema general del funcionamiento y estructura de la mesa XY



(JARAMILLO OCAMPO, y otros, 2008)

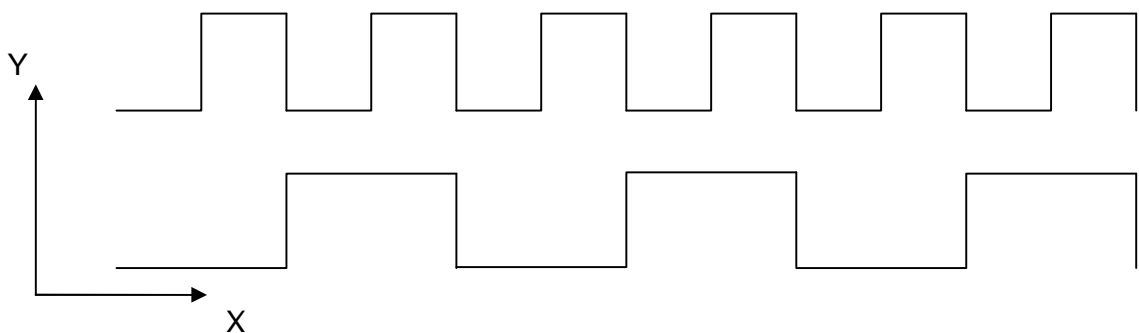
Con el fin de obtener siempre los mismos resultados en el proceso ejecutado por el sistema, el desempeño total del mismo se subdividió en 4 fases:

1. *Búsqueda de los extremos*: Cuando el equipo es encendido de manera automática los motores son activados a velocidad alta (uno a la vez) en la dirección de los Microswitch, con el fin de encontrar el punto más extremo de la mesa para ambos ejes, es decir, el punto en el cual los Microswitch son activados.
2. *Búsqueda del punto (0,0)*: Una vez activados los Microswitch, los motores serán activados en el sentido contrario y por medio de las medidas de los encoder, la mesa se moverá hasta el punto medio sobre cada eje, denominado anteriormente como (0,0). Para realizar esta tarea los motores giran a velocidad media.
3. *Posición inicial*: En el momento en que la mesa se encuentre ubicada en el punto de referencia (0,0), se podrá buscar el punto en el cual se desea iniciar el

movimiento, para esto, la mesa se moverá de igual forma que en la búsqueda del punto (0,0).

4. *Movimiento en XY*: Una vez ubicada en el punto de inicio, los motores deberán moverse con la velocidad mínima disponible para asegurar la mayor precisión posible por parte del sistema de los encoder. En esta fase el movimiento a lo largo del eje Y se encuentra alternado con el movimiento del eje X, con el fin de generar las figuras inicialmente propuestas (Ilustración 27).

Ilustración 27. Movimientos Finales de la mesa XY

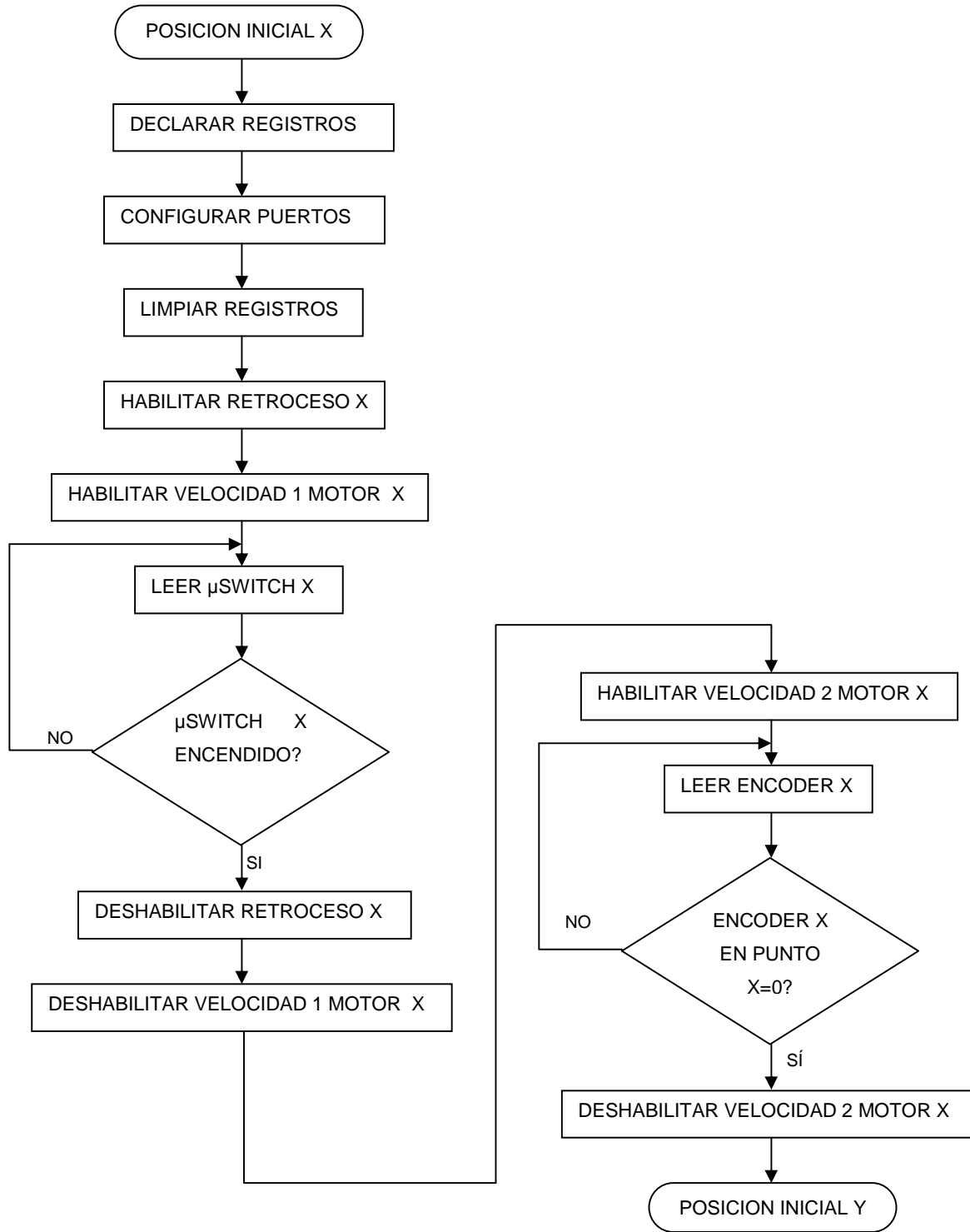


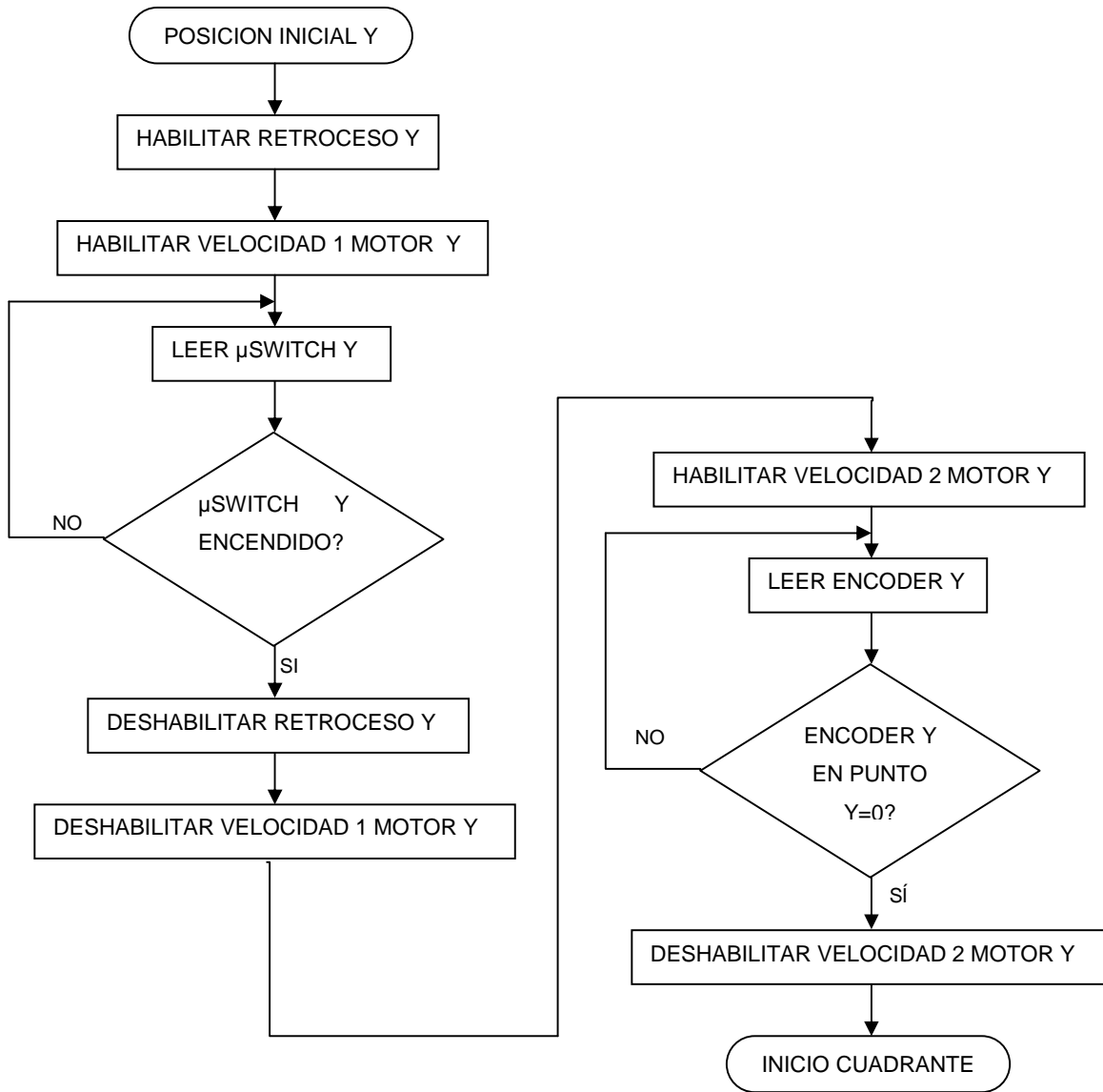
Debido a que esta es la primera fase del proyecto, el control del sistema se realiza bajo los parámetros anteriormente mencionados, mediante los cuales el sistema en cada una de las etapas tiene una velocidad única previamente determinada. Esto origina que la velocidad de respuesta del sistema sea pobre, sin embargo, se espera que en futuros adelantos del proyecto un control proporcional, integral, derivativo sea implementado en el sistema con el fin de optimizar la velocidad de respuesta.

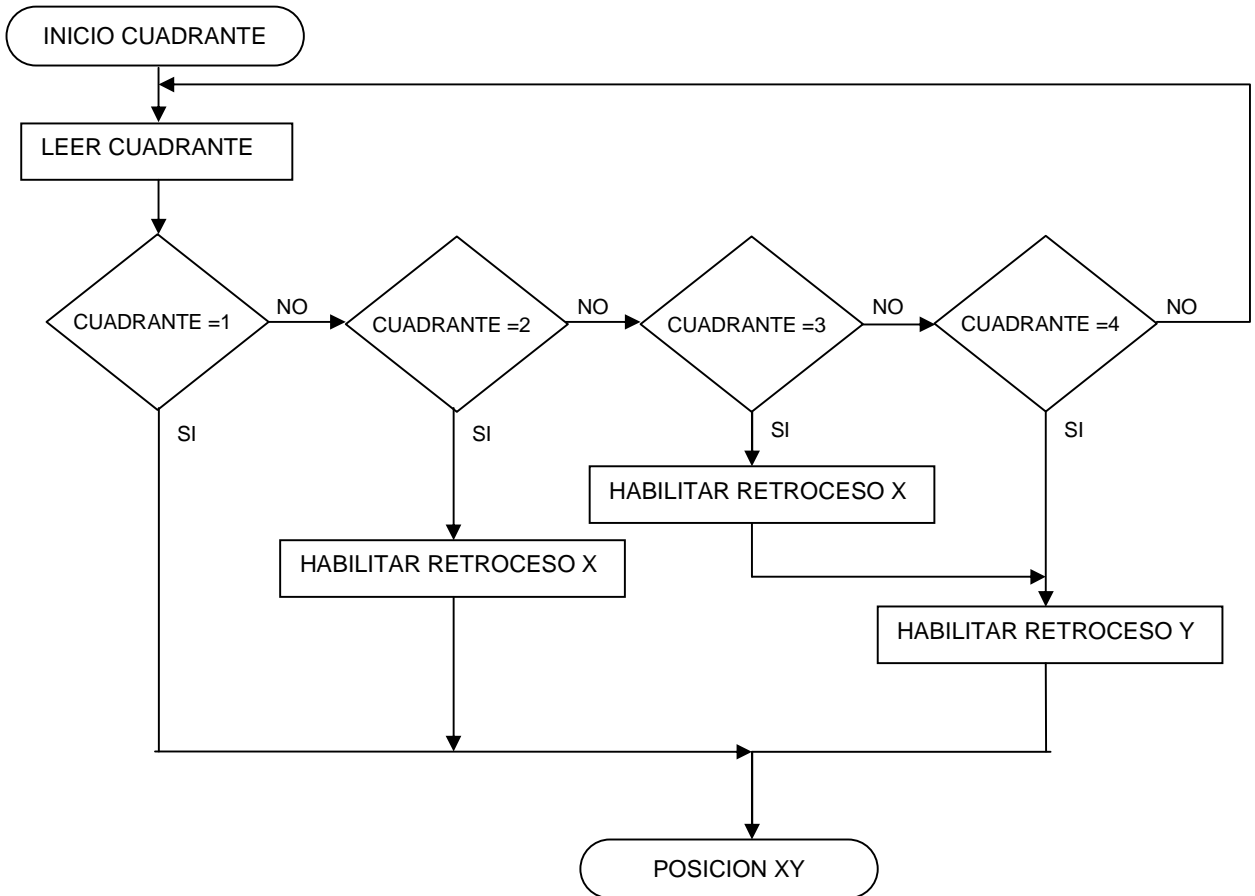
7.8. Programación del Microcontrolador

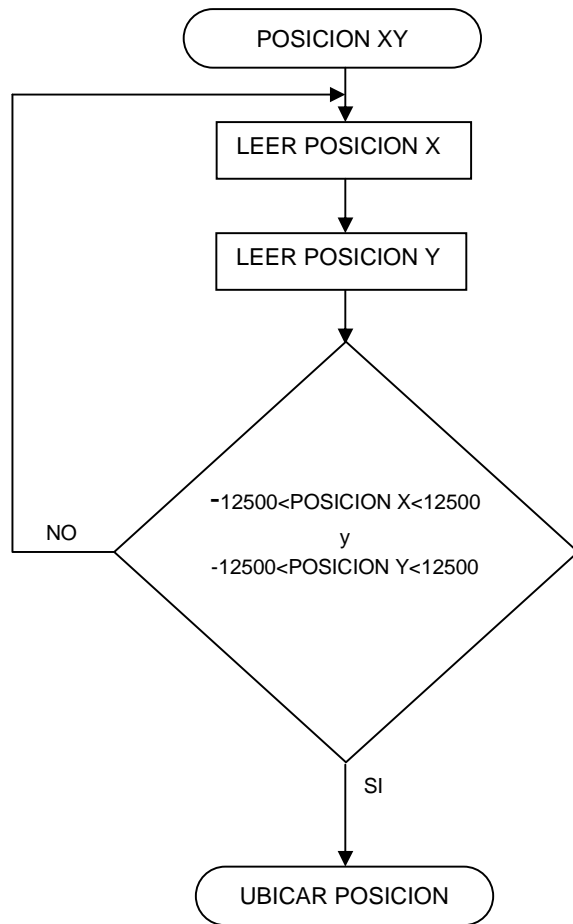
Para generar la señal que controla los motores, se utiliza un Microcontrolador Pic 16F877A, el cual genera señales de PWM por dos de sus terminales de salida, uno para el motor en el eje X y otro para el motor del eje Y. La información de los tiempos altos de la señal (t_{on}) que debe generar el microcontrolador para cada terminal, varía de acuerdo a la fase que esté realizando el motor, para la fase 1 se tendrán valores de PWM elevados, para las fases 2 y 3 valores medios, y para la fase 4 valores pequeños, con el fin de obtener la velocidad deseada en cada una de las diferentes fases. El diagrama de flujo del programa se muestra en la Ilustración 28.

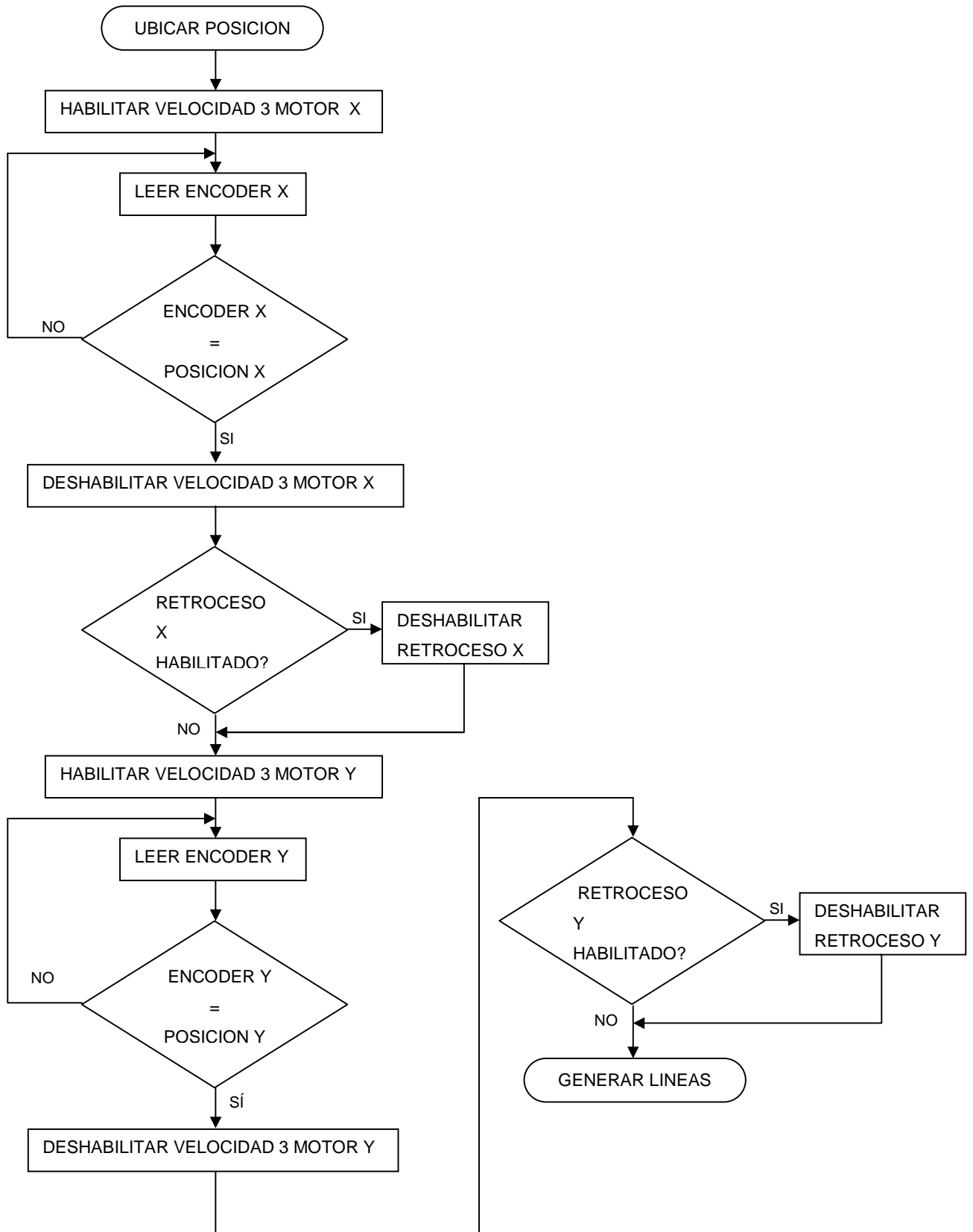
Ilustración 28. Diagrama de Flujo del programa

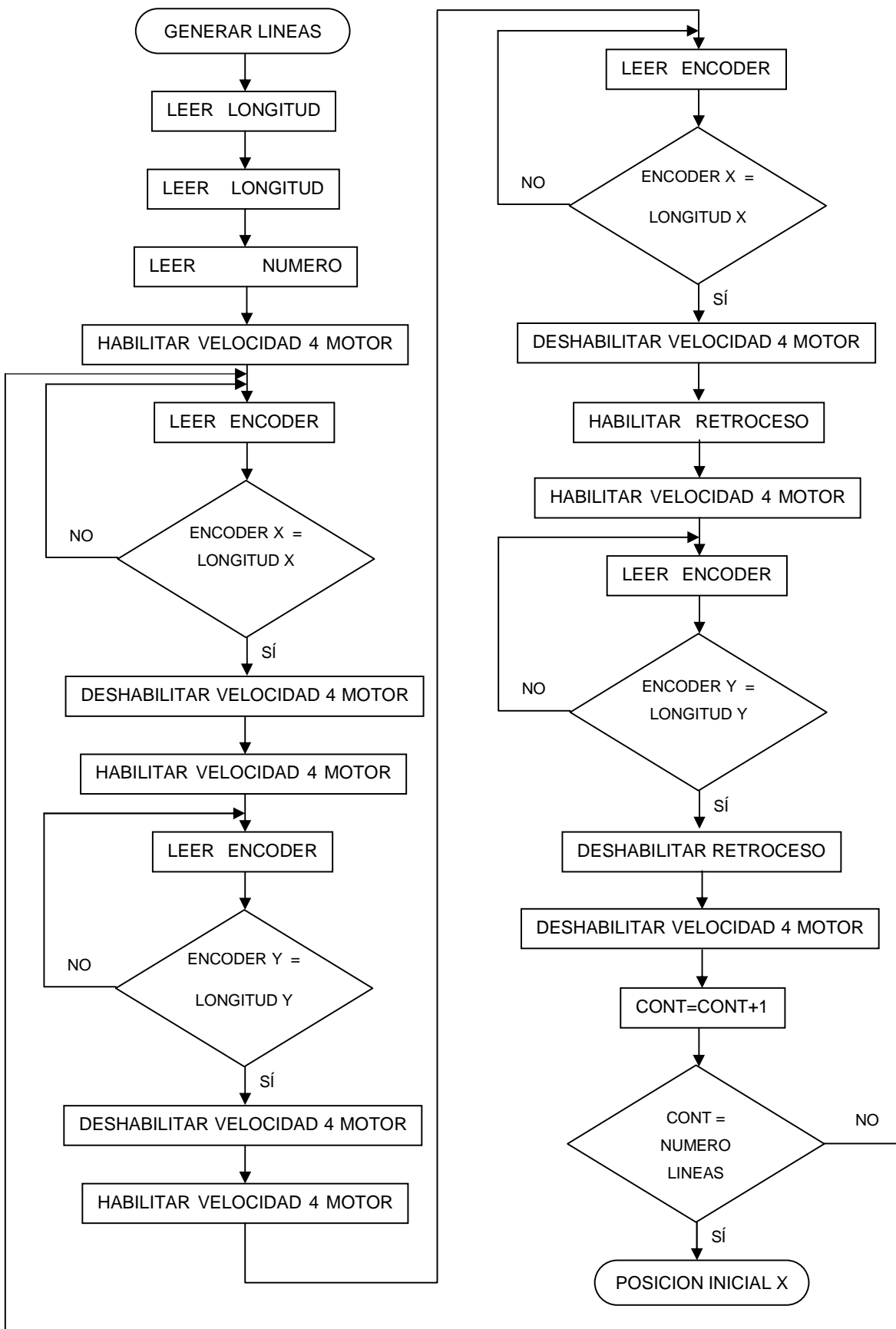










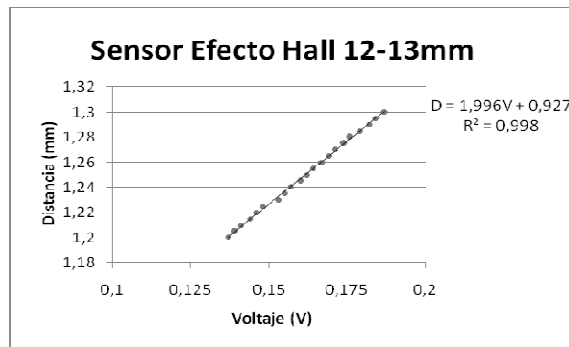


8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

8.1. Sensores

Una vez realizada la calibración presentada en la Ilustración 20, se realizó una calibración de mayor precisión en el área en donde previamente se decidió que estaría el cero como se muestra a continuación. (Ilustración 29).

Ilustración 29. Curva de Sensor Efecto Hall 12-13 mm



La salida del sensor fue conectada al microcontrolador e interpretada por este como una señal analógica que internamente es convertida en digital con una precisión de 10 bits; el valor máximo de los microcontroladores con los que se cuenta. Esto significa que el microcontrolador puede diferenciar $1024 (2^{10})$ posibles estados de voltaje, es decir, si se tiene un valor de voltaje máximo de 5V la resolución de voltaje es:

Ecuación 11. Resolución de Voltajes para el microcontrolador

$$\frac{5V}{1024} = 4.8mV$$

Por lo tanto para variaciones de voltaje inferiores a $4.8mV$ el microcontrolador no responde de manera deseada, es decir, no es capaz de distinguir entre dos posiciones diferentes. Así, según la calibración realizada, la resolución obtenida por el microcontrolador a partir de la señal de salida de los sensores de *Efecto Hall* es, teóricamente de $40\mu m$. Sin embargo, los resultados experimentales se comportan de manera diferente, pues los valores digitales que el microcontrolador adquiere oscilan entre 5 valores sin obtenerse estabilidad alguna, lo que corresponde a valores mayores de $200\mu m$. Por lo cual el sensor de *Efecto Hall* es descartado como sensor de referencia para posicionar la mesa en el punto (0,0).

Posteriormente se realizan montajes simultáneos de un Microswitch y de un sensor inductivo en lugar de los sensores de Efecto Hall, en este caso se encuentra que por medio de estos montajes los sensores inductivos poseen la desventaja de tener histéresis luego de varios ciclos de uso; de otro lado, el microswitch empleado muestra que tiene una vida útil promedio de 300.000 ciclos.

Por tal motivo, los Microswitch son empleados como sensores de referencia para encontrar los puntos más extremos de la mesa, al igual que para la ubicación de un punto de referencia denominado (0,0).

En cuanto a los sensores principales, se encontró que utilizando conteos del encoder de manera unidireccional existía una incertidumbre de $5\mu m$ adicionales, para lo cual, en los encoder se emplearon los discos de 50 líneas de manera bidireccional, sin embargo, en futuros desarrollos del proyecto queda abierta la posibilidad de duplicar la resolución del sistema utilizando un disco de 100 líneas de manera bidireccional.

8.2. Motores

Para corroborar el adecuado desempeño de los motores, se procedió a comparar si en la práctica los motores se comportaban como se predijo teóricamente. Para esto se midió el avance que tenían los tornillos para cada paso del motor esperando encontrar un avance de 5 μ m, tal y como lo había predicho el cálculo teórico.

Con esta prueba, se encontró que los pasos del motor no eran siempre los mismos, y que oscilaban alrededor de los 5 μ m. Las herramientas con las cuales se tomaron estas medidas poseen precisión máxima de 1 μ m, con lo cual, solo se pudo conocer que el motor tenía pasos de 5 μ m \pm 1 μ m, es decir, por medio del instrumento de medida se pudo conocer que existían pasos con avances entre los 4 μ m y los 6 μ m, lo que originaba que el encoder, ya sea de 50 líneas por vuelta o de 100, nunca pudiese estar totalmente alineado.

La solución más directa que se encontró fue utilizar el propio tornillo micrométrico como instrumento de comparación entre los pasos dados por el motor y el avance hecho por el propio tornillo; pues se esperaba que a lo largo de cada vuelta del motor (correspondiente a 100 pasos) y por ende del tornillo, este recorriese 500 μ m. Como se mencionó anteriormente, los pasos de estos motores no son uniformes, sin embargo, al momento de realizar un giro completo, es decir, 100 pasos, podrían obtenerse las 500 micras esperadas en el desplazamiento a pesar de que cada uno de los pasos no desplazaba exactamente 5 μ m al tornillo gracias a que algunos pasos serían menores a y otros mayores a 5 μ m. Se realizaron ensayos para 1, 2, 4 y 8 vueltas; llegando a perder 7 pasos por vuelta.

Adicional a estos problemas, la mesa XY posee en su interior resortes (sobre ambos ejes X, Y) los cuales cumplen la función de devolver la mesa a su estado inicial (Ilustración 30). La fuerza a vencer para generar un desplazamiento en la mesa es precisamente la de estos resortes.

Esta fuerza es proporcional a la distancia en la cual se encuentre ubicado el sistema, por lo tanto el torque requerido en los motores no será uniforme a lo largo del recorrido de la mesa.

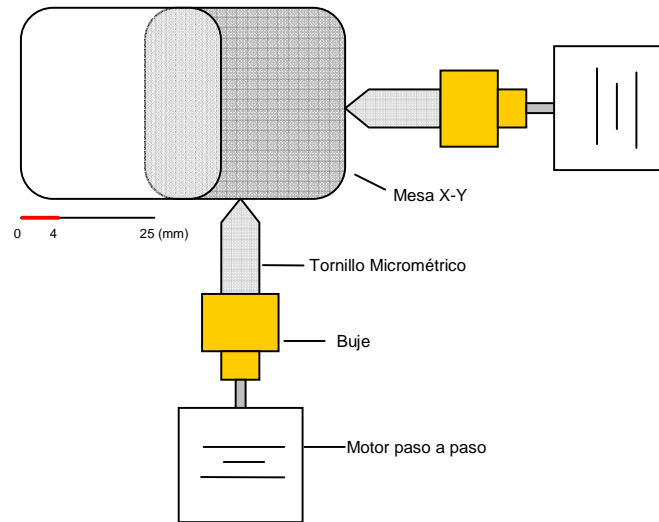
Ilustración 30. Resortes de la mesa para un eje



Debido a que el torque ofrecido por los motores de paso adquiridos no es el suficiente para algunos segmentos del desplazamiento, la cantidad de pasos perdidos por vuelta está en función de los resortes que se encuentran al interior de la mesa XY; es decir, en función de la distancia a la que los resortes se encuentren bajo tensión.

Al implementar los motores paso a paso en el sistema, se encontró que entre los 0mm y 4mm de avance de la mesa (Ilustración 31) el motor no poseía el suficiente torque para desplazarla y en vez de eso se ocasionaban saltos y vibraciones por parte del motor.

Ilustración 31. Recorrido de la mesa en dirección X



En vista de estos inconvenientes en la implementación de los motores, se puso en consideración el uso de motores DC. Para el empleo de este tipo de motores era necesario la implementación de un motoreductor para cada uno de los motores, de tal modo que la velocidad angular de su eje disminuyese de manera notable, para tal efecto se llevó a cabo la adquisición de 2 motores DC con motoreductor marca Bühler 61.46.035 (Ilustración 32) de 23,5 V DC con una fuerza axial de 14N y una fuerza radial a 5 mm de la superficie de montaje de 50N (BÜHLER MOTOR®, 2007). De manera experimental se corroboró a simple vista que este tipo de motores posee un torque mucho mayor a los motores de paso anteriormente empleados, por lo que los 25mm de recorrido total se cumplen con facilidad.

Ilustración 32. Motor DC

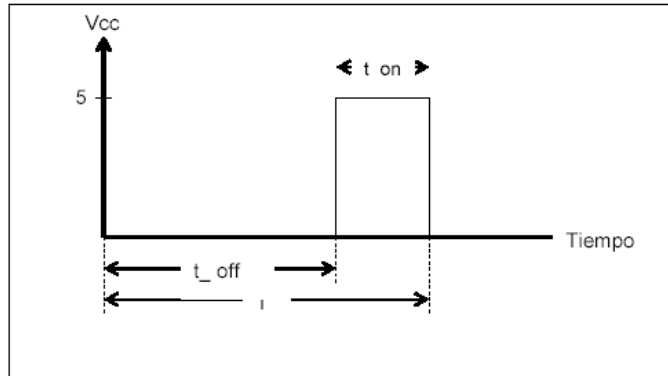


(BÜHLER MOTOR@, 2007)

Los motores DC a diferencia de los motores paso a paso, no ejercen torque al quedar inactivos, por lo tanto el tornillo micrométrico al igual que la mesa pueden llegar a moverse con facilidad; sin embargo, el juego de engranajes al interior del moto reductor asegura que el sistema queda en un solo lugar y que por lo tanto no habrá ningún movimiento indeseado.

La velocidad de giro de su eje es generada y controlada por medio de una señal PWM (“Pulse Width Molulation”) también llamada modulación de ancho de pulso, la cual está compuesta por un ciclo repetitivo de una onda cuadrada con un periodo constante T ; tiempo en el que la señal genera un pulso con un tiempo de señal en bajo (t_{off}) y un tiempo de señal en alto (t_{on}) determinado, que al ser modificado, el motor cambia su posición y velocidad. Los valores de t_{off} y t_{on} varían de 0 V DC a 5 V DC de manera digital. (Ilustración 33). Este pulso es enviado por el microcontrolador, al igual que un circuito asociado que asegure el buen desempeño de este sistema.

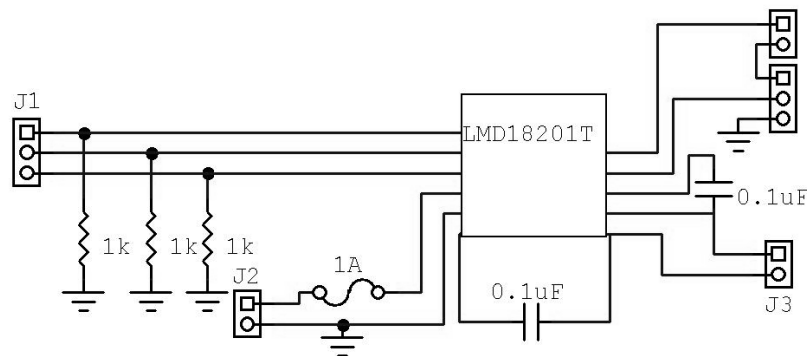
Ilustración 33. Diagrama señal PWM



(CORREA CASTAÑO, 2007)

Para que el microcontrolador envíe la señal PWM a los motores se diseñó el circuito mostrado en la Ilustración 34, este circuito con un puente H permite que el motor gire en ambas direcciones.

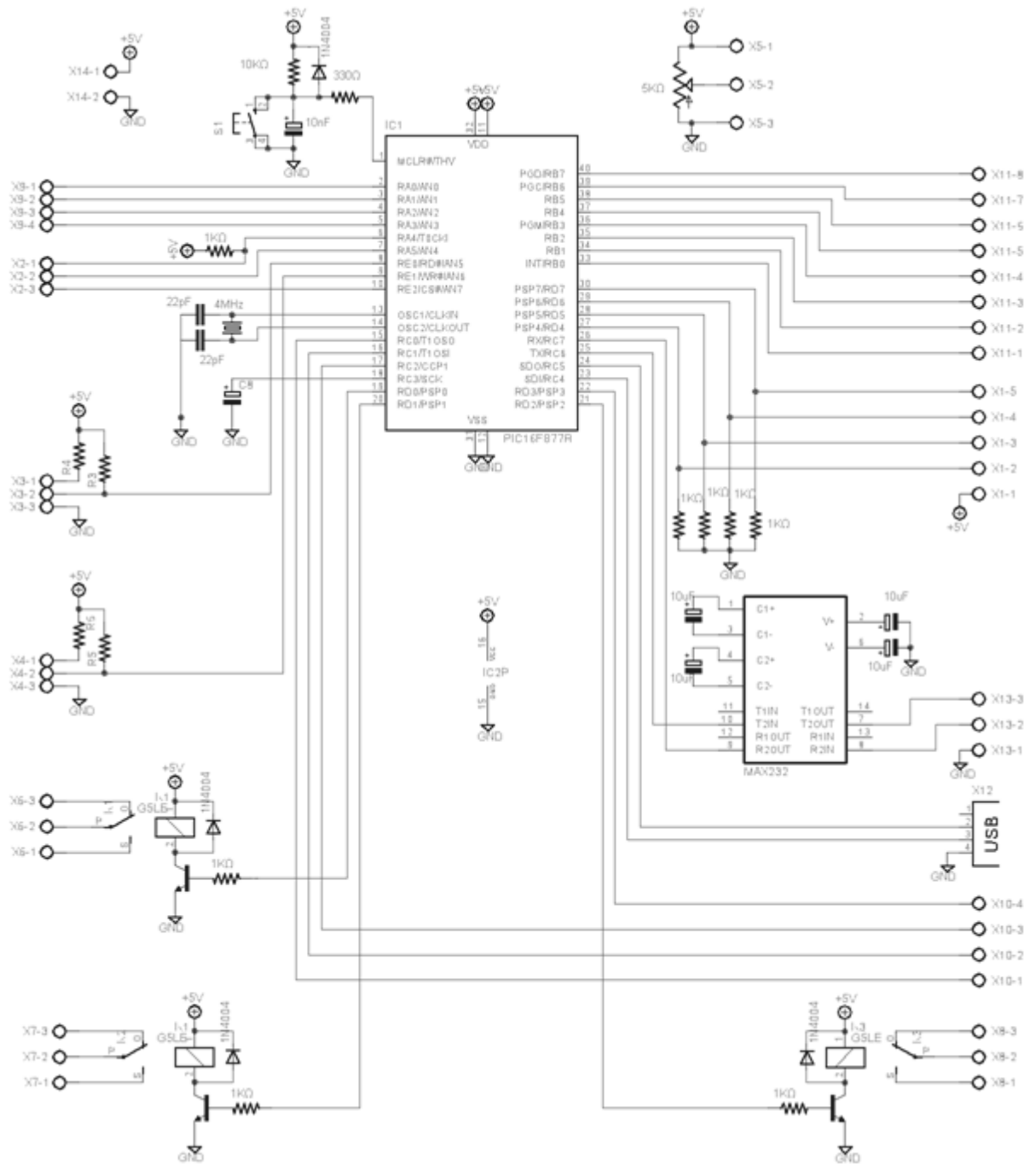
Ilustración 34. Circuito con puente H para motores con PWM



En donde J1 corresponde a la salida del circuito hacia el microcontrolador para el PWM, el freno y la dirección respectivamente, J2 corresponde a la alimentación, J3 corresponde a la conexión del motor (los terminales no mencionados, no interfieren con lo requerido actualmente).

Debido al cambio de los motores, también se implementaron cambios en la tarjeta electrónica como se muestra en la Ilustración 35

Ilustración 35. Tarjeta electrónica para motores DC



En donde X10 pasó a ser las salidas de PWM y dirección de giro hacia el circuito con puente H y X9 pasó a ser entradas o salidas libres; el resto del circuito se mantiene igual que el circuito inicialmente diseñado con los motores de paso.

8.3. Pruebas y ensayos

Los tornillos micrométricos fueron enviados al laboratorio de metrología de la universidad EAFIT con el fin de establecer la veracidad de los mismos en la medida, y, a partir de estos conocer si el sistema genera los movimientos indicados.

Estos fueron calibrados bajo la norma NTC 4495-1998 por medio de una caja de patrones Mitutoyo de 10 unidades con certificado de calibración No 163333 de la superintendencia de industria y comercio. Los patrones que poseen diferentes medidas nominales, que fueron comparadas con el valor medido en los tornillos y a partir de estas se obtuvo el error del instrumento. El error máximo permisible en la medida según la norma es de $\pm 4\mu\text{m}$, sin embargo, según los informes de calibración, para uno de los tornillos (eje Y) el error se encuentra entre $0\mu\text{m}$ y $+0.8\mu\text{m}$ y para el otro tornillo (eje X) el error se encuentra entre $-0,2$ y $+2\mu\text{m}$. Adicional a este error, se considera que bajo las condiciones mediante las cuales fue realizado el informe, la incertidumbre de la medición es igual a $\pm 2\mu\text{m}$ para un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, en el peor de los casos, el error de los instrumentos podría llegar a ser $+4,2\mu\text{m}$ para el eje X y $+2,8\mu\text{m}$ en el eje Y. Por lo cual a partir de los informes No 4501-729725 (eje Y) y No 4502-729725 (eje X) (Ver ANEXO A) se espera que la incertidumbre en la medida de los tornillos sea de $\pm 4,5\mu\text{m}$ para el eje X y de $\pm 3\mu\text{m}$ para el eje Y, valores que a partir del informe entregado, deberán ser tenidos en cuenta al momento de realizar medidas.

Una vez que los diferentes componentes de la mesa estuviesen listos, terminada la programación y probada la electrónica, se procede entonces a realizar las pruebas de movimiento y control de la mesa, evaluando factores como la estabilidad, firmeza y

fidelidad de los movimientos, el comportamiento con el uso cíclico, el desgaste y comportamiento de los motores, entre otros.

Para esto se propone una secuencia de movimientos, descritos en cada una de las pruebas, los cuales debe realizar la mesa y se debe repetir un número determinado de ciclos (10) que permita hacer un análisis del comportamiento del sistema.

La primera prueba realizada fue la ubicación en el punto de referencia (0,0). Esta se realizó de manera satisfactoria, pues la mesa en cada una de las 10 veces en que se llevó a cabo tuvo un margen de error de 5 μ m. Sin embargo, se encontró que el motivo de esta incertidumbre no era el sistema ni su calibración, sino un juego entre el eje del motor y su sistema de reducción. Esta incertidumbre de $\pm 2,5\mu$ m es intrínseca del sistema de reducción empleado, y por lo tanto deberá tenerse en cuenta a lo largo de todas las pruebas siguientes.

La segunda prueba realizada fue el posicionamiento en un punto indicado, para este caso en la posición (-500 μ m, 500 μ m). De igual manera que con la primera prueba, el sistema se ubica satisfactoriamente en el punto indicado con una incertidumbre de 5 μ m. Como se previó desde un principio, la mesa tendría la posibilidad de avanzar con un paso mínimo de 5 μ m debido a la resolución del encoder como previamente se discutió, por lo tanto en esta prueba se comprobó que la mesa tendría problemas para la ubicación de puntos diferentes a los puntos con valores múltiplos de 5 adicionando un error en micras de la diferencia entre el valor deseado y el valor múltiplo de 5 inmediatamente anterior a él. Esto significa que el valor máximo adicional en función de la ubicación es de 4 μ m (9 μ m-5 μ m) y el error mínimo en función de la ubicación es de 0 μ m.

Luego, se realizó una prueba por medio de la cual se pudiese establecer el comportamiento de la mesa luego de varios ciclos de uso al ubicarse en diferentes posiciones. Para esto se realizaron avances cada 5 conteos o pasos del encoder

iniciando en 1 paso, tanto para el eje X (Ilustración 36) como para el eje Y (Ilustración 37).

Ilustración 36. Gráfica de Desplazamientos Vs Pasos Encoder(X)

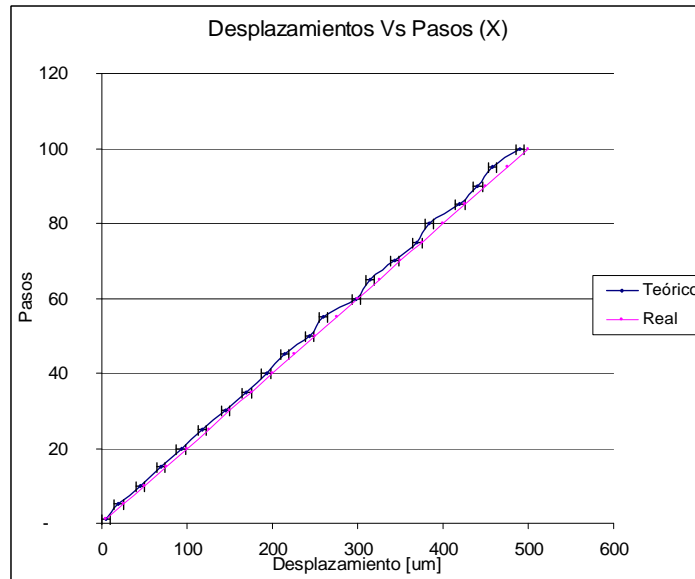
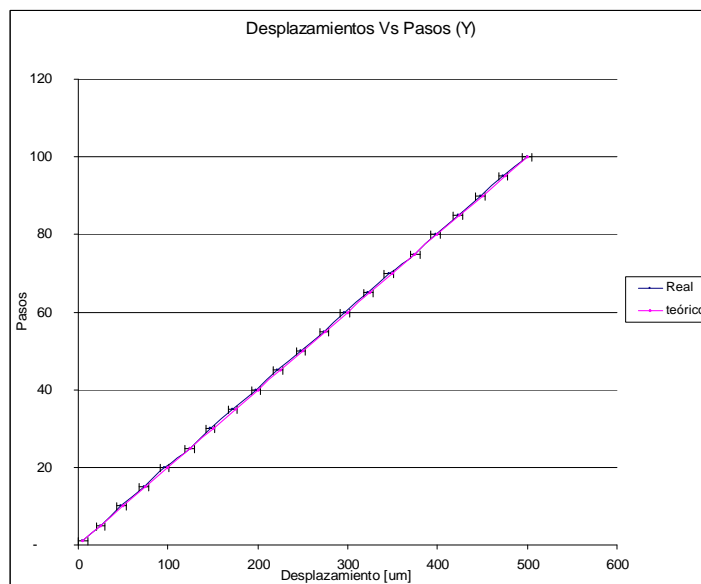


Ilustración 37. Gráfica de Desplazamientos Vs Pasos Encoder (Y)



Como se observa en las ilustraciones, el comportamiento del eje Y es óptimo y se encuentra dentro de los parámetros establecidos para todos y cada uno de los puntos medidos. Sin embargo, el eje X posee comportamientos erráticos en diferentes puntos del sistema, pues a partir de las gráficas anteriores se evidencia que el movimiento de la mesa en el eje X no siempre se encuentra dentro de los parámetros inicialmente establecidos.

Se evidencia además que el error se incrementa a medida que el desplazamiento aumenta, por lo cual, puede considerarse que para desplazamientos pequeños el sistema se desempeña de manera adecuada.

Para conocer la incertidumbre del sistema a lo largo del eje X es necesario conocer todos los posibles errores que inciden dentro de él, en este caso se tienen:

- $\pm 2.5\mu\text{m}$ debido al juego entre el sistema de engranajes del motor.
- $\pm 2\mu\text{m}$ debido al error de ubicación por la resolución del encoder.
- $\pm 4,5\mu\text{m}$ debido a la incertidumbre dada en el tornillo según el laboratorio de Metrología.

Según la teoría de propagación de errores, y por ser este tipo de error un error aditivo, se puede calcular el error máximo del sistema en el eje X por medio de la Ecuación 12. Error Acumulado del sistema

Ecuación 12. Error Acumulado del sistema

$$Error = \sqrt{2.5^2 + 4,5^2 + 2^2} = \pm 5.52\mu\text{m}$$

Por lo tanto, la incertidumbre del sistema actual en el eje X sobrepasa la incertidumbre inicialmente planteada.

En cuanto a la incertidumbre del motor y del tornillo, no existe manera de corregirlas de otra manera que reemplazando los componentes por unos con menor error, por lo cual el error asociado a los componentes del sistema que han sido impuestos es:

Ecuación 13. Error del Motor y Tornillo (X)

$$Error = \sqrt{2.5^2 + 4.5^2} = \pm 5.15 \mu m$$

Este es un error que no puede ser corregido actualmente. En función de esto, el eje X del sistema se encuentra limitado por los errores propios de los componentes, por tal motivo, la resolución del sistema lograda a lo largo del eje X será $10 \pm 5 \mu m$.

El error en el eje Y asociado al motor y al tornillo, es menor que el error del eje X, debido a que el tornillo utilizado en el eje Y fue con el que menor error se obtuvo en el informe de calibración.

Ecuación 14. Error del Motor y Tornillo (Y)

$$Error = \sqrt{2.5^2 + 3^2} = \pm 3.75 \mu m$$

Sin embargo, como el desempeño del sistema a lo largo del eje Y es satisfactorio, no se realizará una discusión más profunda acerca de su incertidumbre.

Con el fin de aminorar el error en el eje X, se realizó una rotación de 90° sobre los movimientos de la mesa, de tal forma que el eje X solo realice pequeños desplazamientos hacia la derecha e izquierda y el eje Y sea quien realice los mayores desplazamientos a lo largo de todo su eje. Ver Ilustración 38

Ilustración 38. Nuevos movimientos finales de la mesa XY

CONCLUSIONES

Enfrentarse a un verdadero problema de ingeniería permite al estudiante aplicar los conocimientos adquiridos durante su formación profesional. Este problema en particular, presenta posibilidades de descubrir nuevos campos de investigación diferentes a los clásicamente desarrollados en ingeniería mecánica. Demuestra que la formación del Ingeniero aporta herramientas metódicas, de pensamiento lógico y disciplina de estudio, que permiten un buen desempeño en áreas como la electrónica, el control digital y el diseño e implementación de software, entre otras.

Desde el punto de vista técnico se logró un diseño que cumple con las necesidades planteadas: Se diseñó un sistema para sensar la posición de la mesa incurriendo en costos menores a los presupuestados por el laboratorio. Se implementó un modelo funcional que es el comienzo de un proceso de desarrollo de una nueva tecnología para la universidad EAFIT. Sin embargo, hay consideraciones que se deben tener en cuenta.

Existen diferentes características tales como resolución, velocidad de respuesta, precisión, entre otras, que pueden ser mejoradas y utilizadas en el desarrollo de nuevos proyectos. El sistema implementado se encuentra en una primera fase, pero ofrece buenas posibilidades para los proyectos que se vienen desarrollando en los centros de Investigación de Mecatrónica y Control digital y al laboratorio de Microingeniería de la Universidad EAFIT.

Uno de los inconvenientes del sistema es que debe realizarse una rutina de inicio mediante la cual el sistema es llevado a sus extremos para conocer su posición actual. Esta rutina se debe realizar cada que se inicie el sistema, pues la información acerca de la posición se pierde una vez desconectada la alimentación a este.

Una vez finalizada esta primera etapa, se puede proceder a mejorar la resolución de la mesa e implementar la etapa de iluminación del proceso litográfico.

El modelo funcional implementado está limitado por la resolución de los sensores, en este caso, los encoders, sobre los cuales debe seguirse trabajando para poder mejorar al sistema. Pues en sistemas que basen su movimiento en motores DC, la resolución de la máquina dependerá únicamente de la resolución del encoder, por lo tanto, si se mejora el sistema de sensado, la resolución será mucho más precisa. Se debe pensar en la implementación de un encoder con el doble de resolución (2.5um) por medio de 100 líneas por vuelta en el disco.

Se espera que en futuras mejoras, el dispositivo pueda ser conectado a un computador y que por medio de este, trayectorias complejas puedan ser realizadas con facilidad a través de tipos de software especializados en esta clase de diseños.

La implementación de motores DC mejoró de manera notable la vibración ejercida sobre la mesa en comparación con el uso de los motores de paso, sin embargo debe medirse y evaluarse la incidencia de la vibración de los motores sobre los movimientos de la mesa.

Las propiedades mecánicas y dinámicas de los motores DC utilizados permiten que el desempeño de este proyecto sea adecuado. Sin embargo, para futuros proyectos se puede pensar en sistemas de reducción de velocidad (motoreductores) con mejores características como el juego entre dientes, reduciendo así los posibles errores en los que se podría incurrir con el sistema actual.

La confiabilidad del tornillo en el eje X es dudosa en función de la curva e informe de calibración pues muestran un comportamiento no uniforme. Por lo tanto el tornillo del eje x (con número de prueba CM 090430-02) debe ser reemplazado si se desea tener una confiabilidad adecuada en la totalidad del sistema.

La herramienta del diseño conceptual logró establecer un orden de diseño, sin embargo, a lo largo del desarrollo del proyecto se presentaron algunas etapas de retroalimentación de manera iterativa.

BIBLIOGRAFÍA

AL-BENDER F. [y otros] Theoretical analysis of the dynamic behavior of hysteresis elements in mechanical systems [Publicación periódica] // Non-linear Mechanics. - [s.l.] : Elsevier, 2004. - 10 : Vol. 39. - págs. 1721-1735. - ISSN: 0020-7462.

AL-BENDER F. y SYMENS W. Characterization of frictional hysteresis in ball-bearing guideways [Publicación periódica] // Wear. - [s.l.] : Elsevier, 2005. - 11-12 : Vol. 258. - págs. 1630-1642. - ISSN: 0043-1648.

ALDABALDETRECU@ Patxi Hl storia Tecnológica [En línea] // Evolución técnica de la máquina-herramienta. Reseña histórica. - 01 de 02 de 2002. - 2 de 4 de 2009. - <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/Articulo.asp?A=1435>.

BRYZEK Janusz Impacts of MEMS technology on society [Publicación periódica] // Sensors and Actuators. - [s.l.] : Elsevier, 1996. - 1-2 : Vol. 56. - págs. 1-9 p.. - ISSN: 0924-4247.

BÜHLER MOTOR@ Bühler Motor [En línea] // Product Search. - 2007. - 22 de 04 de 2009. - http://www.buehlermotor.com/C12572C600247071/CurrentBaseLink/W273RD58524WEBREN?open&at_query=*&at_par=sf=x;prod=gearmotor;ccat=1.

CORREA CASTAÑO David Diseño y construcción de mano animatrónica. - Medellín : [s.n.], 2007. - Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Tesis Pregrado.

CRUZ@ Carolina Universidad de Veracruz [En línea] // Le entra Ingeniería-Veracruz al reto de la nanotecnología. - 03 de 02 de 2009. - 3 de 2 de 2009. - <http://www.uv.mx/boletines/banner/180505/mems.htm>.

FRANK Thomas Two-axis electrodynamic micropositioning devices [Publicación periódica]. - [s.l.] : IOPscience, 1998. - 2 : Vol. 8. - págs. 114-118.

FRANSSILA Sami Introduction to Microfabrication [Libro]. - [s.l.] : Wiley, 2004. - ISBN: 978-0-470-85106-7.

FUNG Rong-Fong, HSU Yi-Lung y HUANG Ming-Shyan System identification of a dual-stage XY precision positioning table [Publicación periódica] // Precision Engineering. - 01 de 2009. - Issue 1 : Vol. Volumen 33. - págs. Pages 71-80. - ISSN 0141-6359 .

GAUTSCHI Gustav Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers [Sección del libro] // Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers. - [s.l.] : Springer, 2002. - ISBN 3540422595.

IntelliDrives@ intelligent linear drives and systems [En línea] // XY Table. - 30 de 01 de 2009. - 30 de 01 de 2009. - http://www.intelldrives.com/xy_tables.html.

JARAMILLO OCAMPO J.M y CARMONA A. Construcción y automatización de un dispositivo de posicionamiento xy con desplazamientos micrométricos para la posterior aplicación en procesos de microfabricación [Informe] / Departamento de Ciencias Básicas ; Universidad EAFIT. - Medellín : [s.n.], 2008. - Grupo de investigación en Física Aplicada.

JUUTI J., LEINONEN M. y JANTUNEN H. Micropositioning [Sección del libro] // Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications / aut. libro Safari Ahmad. - [s.l.] : Springer, 2008. - ISBN: 978-0-387-76538-9.

LOPERA S y AL Tecnologías de Microfabricación en La Universidad Nacional de Colombia. - Medellín : [s.n.], 30 de 08 de 2007.

LOPERA@ S., PALACIO@ J.L y CATELBLANCO@ J. Scribd [En línea] // Avances Hacia El Desarrollo de MEMS en Colombia.. - 1 de 2 de 2009. - 3 de 2 de 2009. - <http://www.scribd.com/doc/11102871/Avances-Hacia-El-Desarrollo-de-MEMS-en-Colombiadoc>.

MACK@ Chris Chris Mack, Gentleman Scientist [En línea] // Semiconductor Lithography - The Basic Process. - 30 de 01 de 2009. - 30 de 01 de 2009. - <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html>.

MICROCHIP@ MicroChip Technology [En línea] // Pic16 MCU Product Family -8 bit Microcontrollers. - 30 de 01 de 2009. - 30 de 01 de 2009. - <http://www.microchip.com/ParamChartSearch/chart.aspx?branchID=1002&mid=10&lang=en&pageld=7..>

MUKHOPADHYAY Deepkishore y DONG Jingyan A SOI-MEMS-based 3-DOF planar parallel-kinematics nanopositioning stage [Publicación periódica] // Sensors and Actuators A: Physical. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - 2 : Vol. 147. - págs. 340-351 . - ISSN: 0924-4247.

NEWPORT CORPORATION@a Newport [En línea] // Manual Positioning Basics . - 2009. - 10 de 04 de 2009. - <http://www.newport.com/Manual-Positioning-Basics/558085/1033/catalog.aspx>.

NEWPORT CORPORATION@b Newport [En línea] // Translation Stage Design . - 2009. - 15 de 04 de 2009. - <http://www.newport.com/Translation-Stage-Design/562287/1033/catalog.aspx>.

NEWPORT CORPORATION@c Newport [En línea] // Manual Positioning - Manual Linear Stages. - 2009. - 15 de 04 de 2009. - <http://www.newport.com/Manual-Linear-Stages/175134/1033/catalog.aspx>.

OTSUKA Jiro y TADASHI Masuda The influence of nonlinear spring behavior of rolling elements on ultraprecision positioning control systems [Publicación periódica]// Nanotechnology. - [s.l.] : IOPscience, 1998. - Vol. 9. - págs. 85-92. - ISSN 0957-4484 .

PAHL G. [y otros] Engineering design: a systematic approach [Libro]. - [s.l.] : Springer, 2007. - Vol. 1. - ISBN 1846283183.

PCB@ Parc Científic de Barcelona [En línea]// Técnicas Fabricación. - 3 de 2 de 2009. - 4 de 2 de 2009. - <http://www.pcb.ub.es/homePCB/live/es/p907.asp>.

PUIG@ Ferran y TORRES@ Marta Interempresas [En línea]// Microfabricación: la revolución pequeña. - 28 de 10 de 2008. - 2009 de 2 de 3. - <http://www.interempresas.net/metalmecanica/Articulos/Articulo.asp?A=1497>.

SANDOOVAL-IBARRA@ Federico y BANKS@ Danny INTRODUCCIÓN A LA MICROINGENIERÍA [En línea]. - 1996. - 02 de 02 de 2009. - http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/micro_ingeneria/sumintro.html#whatis.

SEOK RHO Jong [y otros] Analysis of a nanopositioning actuator using numerical and analytic methods [Publicación periódica]// International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. - [s.l.] : IOP Press, 2008. - 3 : Vol. 28. - págs. 379-394.

SOTO Eduardo Motor Paso a Paso [Informe] / Departamento de Electricidad ; Universidad Técnica Federico Santa María. - 2005.

TIAN Yanling, BIJAN Shirinzadeh y ZHANG Dawei Development and dynamic modelling of a flexure-based Scott–Russell mechanism for nano-manipulation [Publicación periódica]// Mechanical Systems and Signal Processing. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - 3 : Vol. 23. - págs. 957-978. - ISSN: 0888-3270.

WEN-YUH Jywea [y otros] A novel 5DOF thin coplanar nanometer-scale stage [Publicación periódica] // Precision Engineering. - Taiwan : Elsevier, 2007. - 4 : Vol. 32. - págs. 239-250 . - ISSN: 0141-6359.

YAO@ Quin, DONG@ J. y FERREIRA@ P.M Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage [Publicación periódica] // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - Illinois, USA : [s.n.], 31 de 6 de 2006. - págs. 946-961. - ISSN: 0890-6955.

YEONG-JUN Choi, SREENIVASAN S.V y BYUNG JIN Choi Kinematic design of large displacement precision XY positioning stage by using cross strip flexure joints and over-constrained mechanism [Publicación periódica] // Mechanism and Machine Theory. - Austin : Elsevier, 2007. - 6 : Vol. 43. - págs. 724-737 . - ISSN: 0094-114X.

YONG-SUB Yi [y otros] Dynamic analysis of a linear motion guide having rolling elements for precision positioning devices [Publicación periódica] // Journal of Mechanical Science and Technology / ed. Engineers The Korean Society of Mechanical. - [s.l.] : Springerlink, 09 de 04 de 2008. - 1 : Vol. 22. - págs. 50-60. - ISSN 1738-494X .

ANEXO A. INFORME DE CALIBRACION 1 Y 2

ANEXO B. FICHAS TÉCNICAS

MICROSWITCH

EFFECTO HALL

FOTOINTERRUPTOR

TORNILLO

MESA

MOTOR

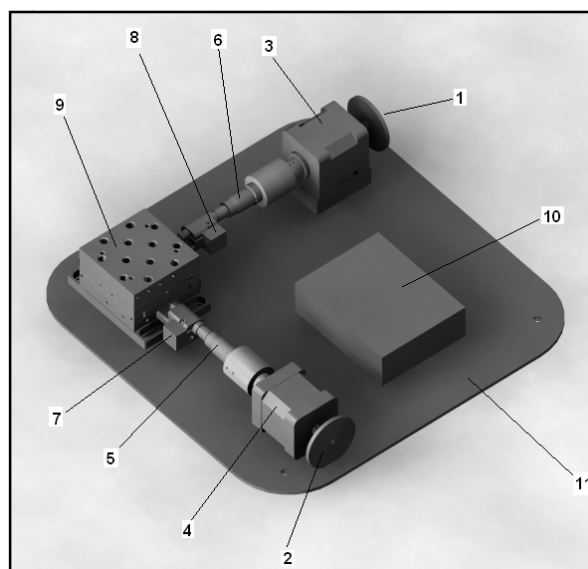
ANEXO C. PLANOS MECÁNICOS

BUJE

MANUAL DE USUARIO Y MANTENIMIENTO

ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA MAQUINA

1. Encoder para el motor en X (Foto interruptor Sharp GP1S094HCZ)
2. Encoder para el motor en Y (Foto interruptor Sharp GP1S094HCZ)
3. Motor en X (Bühler 61.46.035 23,5 V DC)
4. Motor en Y (Bühler 61.46.035 23,5 V DC)
5. Tornillo micrométrico Y (Newport SM-25)
6. Tornillo micrométrico X (Newport SM-25)
7. Microswitch para X (DM1-00P-110G)
8. Microswitch para Y (DM1-00P-110G)
9. Mesa XY (Newport SG-462-XY-M)
10. Representación de la caja de control electrónico
11. Soporte para el sistema



CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

VOLTAJE DE ENTRADA	110V AC
DIMENSIONES GENERALES	33cm x 33cm x 12cm
RANGO DE DESPLAZAMIENTOS (X,Y)	[-12500,12500]um
DESPLAZAMIENTO MINIMO (X,Y)	5um
SENSITIVIDAD	1um
NUMERO MAXIMO DE LINEAS	999 Líneas
VIDA UTIL (ANTES DE PRIMER REVISION)	1 AÑO

DATOS TÉCNICOS

Los principales datos técnicos se muestran a continuación:

FUENTE DE POTENCIA	
VOLTAJE ENTRADA	110V AC
VOLTAJE SALIDA	24VDC
FRECUENCIA	60Hz
COPRRIENTE	4A

FUENTE DE CONTROL	
VOLTAJE ENTRADA	110V AC
VOLTAJE SALIDA	5VDC
FRECUENCIA	60Hz
COPRRIENTE	2A

SENSOR ENCODER		
ENTRADA	VOLTAJE	6V DC
	CORRIENTE	50mA
	POTENCIA DISIPADA	75mW
SALIDA	VOLTAJE	6V DC
	CORRIENTE	20mA
	POTENCIA DISIPADA	75mW

DISPLAY LCD	
VOLTAJE DE ENTRADA	7V DC
NUMERO DE CARACTERES	16CH*2LINEAS
FUENTE CARACTERES	5*7 PUNTOS
METODO DE MUESTREO	1/16 MULTIPLEXADO

MOTOR DC	
CORRIENTE (MEDIA)	0,35A
TORQUE (MEDIO)	150mNm
VELOCIDAD MEDIA @ 24V	121 rpm
VELOCIDAD MEDIA SIN CARGA	160 rpm
TORQUE	420 mNm
FUERZA AXIAL	15N
FUERZA RADIAL @ 5mm	40N

TORNILLO	
AVANCE POR VUELTA	0,5mm
GRADUACIONES	10 μ m
RESOLUCIÓN	1 μ m
RECORRIDO	25 mm

MESA XY	
RECORRIDO MAXIMO	25 mm
DESVIACION ANGULAR	<100 urad
CARGA CENTRADA MAXIMA	191 N
CAPACIDAD DE CARGA VERTICAL	67 N

MICROSWITCH	
VIDA UTIL MECANICA	500,000 ciclos
VIDA UTIL ELECTRICA	300,000 ciclos
RESISTENCIA DE CONTACTO	< 50 m Ω
HUMEDAD DE TRABAJO	< 85% HR
FUERZA DE OPERACION	30-40 gf

MANTENIMIENTO

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

A la hora de ejecutar cualquier operación de mantenimiento, es necesario cumplir los requisitos:

1. Nunca se debe efectuar ninguna operación con la máquina en marcha.
2. Se debe desconectar el cable de la conexión eléctrica.
3. Se han de seguir estrictamente las indicaciones del manual.
4. Limpie y despeje la zona de trabajo.
5. No deje la máquina expuesta a la lluvia. Tampoco la use en lugares húmedos o en ambientes con riesgos de incendio o explosión.
6. No mueva la máquina de su lugar de trabajo.
7. No transporte la herramienta tirando de los cables ni tire de estos.
8. Siempre que vaya a usar la herramienta compruebe con detenimiento si hay alguna pieza deteriorada; todo ello para tener la certeza de que la maquina va a funcionar adecuadamente.
9. Compruebe que el teclado y el display se encuentren en buen estado.
10. Verifique que las conexiones son las adecuadas.
11. La máquina debe estar desconectada cuando no se esté usando.
12. En caso de algún inconveniente comuníquese con el encargado del Laboratorio

MANTENIMIENTO.

1. La máquina se encuentra diseñada para mantenerse en una sala limpia, por lo tanto, la limpieza de la máquina debe estar sujeta a la periodicidad y protocolo de limpieza de este tipo de salas.
2. Realice mantenimiento de la mesa X-Y cada 2 meses conforme lo indique el fabricante (Newport).
3. Verifique que los componentes electrónicos estén en correcto estado, sino es así, cámbienlos por sus equivalentes.
4. Realice revisión periódica de los componentes mecánicos (mesa, bujes y tornillos) con el fin de determinar su adecuado funcionamiento. (Revisión anual).
5. Una vez al año los tornillos micrométricos deben ser enviados al Laboratorio de metrología de la universidad EAFIT para su calibración.
6. Cada vez que el sistema sea desarmado, o se retiren los tornillos se requiere que la maquina sea recalibrada para ubicar el punto (0,0)

RECOMENDACIONES DE USO.

1. Tenga en cuenta el voltaje de las fuentes eléctricas. El voltaje debe coincidir con el especificado en la placa de identificación.
2. No dejar encendida la máquina para evitar calentamiento de la misma
3. Para el encendido de la maquina es necesario que ambas fuentes estén conectadas (24V/5V).
4. Compruebe que la mesa, tornillos y motores estén en buen estado, no deben estar húmedos, agrietados o dañados. Observe si se producen ruidos, vibraciones o chispas inusuales. A continuación compruebe que los elementos estén montados correctamente.
5. No haga presión sobre la mesa, el peso sobre esta podría ocasionar un daño permanente en el sistema.
6. No deje caer químicos ni material corrosivo sobre la mesa, ni utilice materiales punzantes que puedan deteriorar la superficie.

7. No toque la máquina mientras se encuentre en funcionamiento.

USUARIO

FUNCIONAMIENTO.

1. Familiarícese con el movimiento y las instrucciones de la máquina previo al trabajo a realizar.
2. Posicione la placa (galleta) donde se indica y asegúrese que está bien ubicada
3. Conecte el equipo a una fuente de 110V.
4. Encienda la máquina por medio del interruptor ON/OFF ubicado en la caja de control.
5. Observe si se producen ruidos o vibraciones inusuales.
6. Compruebe que la pantalla LCD y uno de los motores enciendan.
7. Espere a que la mesa se ubique en la posición (0,0).
8. Verifique por medio de la pantalla LCD cuando la mesa se ubique en el punto (0,0).
9. Verifique que los tornillos se encuentren en la posición 12.500 mm cada uno.
10. Seleccione con el teclado el cuadrante en el cual se iniciará el recorrido de la mesa (I (1), II (2), III (3) o IV (4)) conforme se pide por pantalla.
11. Ingrese por medio del teclado la posición en μm en la cual se iniciará el recorrido de la mesa (número de cinco (5) dígitos) con un intervalo máximo de (-12500 μm , 12500 μm)
12. Espere a que la mesa se ubique en la posición indicada.
13. Ingrese por medio del teclado la longitud de avance en X y la longitud de avance en Y (dos (2) dígitos para X y dos (2) para Y)
14. Ingrese por medio del teclado el número de líneas en X a ejecutar por parte de la mesa (tres (3) dígitos).
15. A medida que el sistema opera, verifique por medio del tornillo los desplazamientos realizados.
16. Espere a que el equipo finalice el procedimiento, verifique en el display el momento de finalización.

17. Si desea reiniciar el proceso presione el botón "reset" ubicado en la caja de control, de lo contrario apague en sistema por medio del interruptor ON/OFF.

ANEXO E. PROGRAMA EN C

```
#INCLUDE <16F877A.h>
#USE DELAY(CLOCK=4000000)
#FUSES XT,NOPROTECT,NOWDT,NOBROWNOUT,NOPUT,NOLVP
#DEFINE USE_PORTB_LCD TRUE
#DEFINE USE_PORTB_KBD
#INCLUDE <LCD.C>
#INCLUDE <KBD.C>
#include <math.h>
#BYTE PORTA=5
#BYTE PORTB=6
#BYTE PORTC=7
#BYTE PORTD=8
#BYTE PORTE=9
#DEFINE DIRECCION_X PORTC,3 // SENTIDO DEL PWM EN X
#DEFINE DIRECCION_Y PORTC,0 // SENTIDO DEL PWM EN Y
#DEFINE ENCODER_Y PORTC,7
#DEFINE SWITCH_Y PORTC,6
#DEFINE ENCODER_X PORTA,0
#DEFINE SWITCH_X PORTA,1
//DEFINO LAS VARIABLES
CHAR k;
INT
C,UNI,DIEZ,CIEN,MIL,DMIL,VAL,CUADR,LONG_LX,LONG_LY,LINEAX,LINEAY,LONG
Y,LONGX, LONG_LY_PASOS,LONG_LX_PASOS;
INT16 X,Y,X5,Y5,PASOS,LONG_TOTAL;
LONG PASOS_INI_X,PASOS_INI_Y;
FLOAT POSICION_X,POSICION_Y,REPETICIONES;
```

```

VOID TECLADO()
{//RUTINA QUE TOMA VALOR POR TECLADO
    k=kbd_getc();
    WHILE(k=='\0')
    {
        k=kbd_getc();
    }
    IF( (k!='\0'))
{
    if(k=='0')
    VAL=0;
    if(k=='1')
    VAL=1;
    if(k=='2')
    VAL=2;
    if(k=='3')
    VAL=3;
    if(k=='4')
    VAL=4;
    if(k=='5')
    VAL=5;
    if(k=='6')
    VAL=6;
    if(k=='7')
    VAL=7;
    if(k=='8')
    VAL=8;
    if(k=='9')
    VAL=9;
}
}

```

```

}
VOID SWITCHX()
{
    //RUTINA QUE LLEVA LA MESA HASTA EL PUNTO X MAS EXTREMO
    WHILE (!BIT_TEST(SWITCH_X))
    {
        BIT_CLEAR(DIRECCION_X); // INDICA LA DIRECCION -X
        set_pwm1_duty(255); // VELOCIDAD MAXIMA DEL MOTOR X
        LCD_GOTOXY(1,1);
        LCD_PUTC("BUSCANDO (0,0)");
        LCD_GOTOXY(1,2);
        LCD_PUTC("REVERSA X");
    }
    set_pwm1_duty(0); //DETIENE MOTOR X
}
VOID SWITCHY()
{
    //RUTINA QUE LLEVA LA MESA HASTA EL PUNTO Y MAS EXTREMO
    WHILE (!BIT_TEST(SWITCH_Y))
    {
        BIT_CLEAR(DIRECCION_Y); // INDICA LA DIRECCION -Y
        set_pwm2_duty(255); // VELOCIDAD MAXIMA MOTOR Y
        LCD_GOTOXY(1,1);
        LCD_PUTC("BUSCANDO (0,0)");
        LCD_GOTOXY(1,2);
        LCD_PUTC("REVERSA Y");
    }
    set_pwm2_duty(0); // DETIENE MOTOR Y
}
VOID CERO_HORARIOX()

```

```

{
    // LLEVA LA MESA AL PUNTO DE REFERENCIA X=0
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("BUSCANDO (0,0)");
    BIT_SET(DIRECCION_X);
    WHILE (X<2633)
    {
        set_pwm1_duty(50); // VELOCIDAD MEDIA/BAJA DEL MOTOR X
        // RUTINA DE ENCODER X
        IF(!BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==1)
        {
            X++;
            C=0;
        }
        IF((BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==0)
        {
            X++;
            C=1;
        }
        LCD_GOTOXY(1,2);
        PRINTF(LCD_PUTC,"POSC X %LU [encd]",X);
    }
    set_pwm1_duty(0);
}
VOID CERO_HORARIOY()
{
    // LLEVA LA MESA AL PUNTO DE REFERENCIA Y=0
    BIT_SET(DIRECCION_Y);
    LCD_PUTC("\f");

```

```

LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("BUSCANDO (0,0)");
WHILE (Y<2580)
{
set_pwm2_duty(50);// VELOCIDAD MEDIA/BAJA DEL MOTOR Y
//RUTINA DE ENCODER Y
IF(!BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==1)
{
Y++;
C=0;
}
IF((BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==0)
{
Y++;
C=1;
}
LCD_GOTOXY(1,2);
PRINTF(LCD_PUTC,"POSC Y %LU [encd]",Y);
}
set_pwm2_duty(0);
}
VOID CUADRANTE()
{
//SE INGRESA POR TECLADO EL CUADRANTE
LCD_PUTC("\f");
LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("EN POSICION(0,0)");
DELAY_MS(3000);
LCD_PUTC("\f");
LCD_GOTOXY(1,1);

```

```

LCD_PUTC("CUADRANTE");
LCD_GOTOXY(1,2);
LCD_PUTC("I, II, III o IV");
TECLADO();
LCD_PUTC("\f");
LCD_GOTOXY(6,2);
lcd_putc(k);
CUADR=k;
LCD_GOTOXY(6,1);
lcd_putc(CUADR);
DELAY_MS(3000);
}
VOID INICIAL_X()
{
//SE INGRESA POR TECLADO LA POSICION INICIAL X
LCD_PUTC("\f");
IF (CUADR=='1')
{
LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("X=");
LCD_GOTOXY(1,2);
LCD_PUTC("Y=");
}
IF (CUADR=='2')
{
LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("X=-");
LCD_GOTOXY(1,2);
LCD_PUTC("Y=");
}
}

```

```

IF (CUADR=='3')
{
LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("X=-");
LCD_GOTOXY(1,2);
LCD_PUTC("Y=-");
}
IF (CUADR=='4')
{
LCD_GOTOXY(1,1);
LCD_PUTC("X=");
LCD_GOTOXY(1,2);
LCD_PUTC("Y=-");
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
LCD_GOTOXY(4,1);
lcd_putc(K);
DMIL=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
LCD_GOTOXY(5,1);
lcd_putc(K);
MIL=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))

```

```

{
    LCD_GOTOXY(6,1);
    lcd_putc(K);
    CIEN=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(7,1);
    lcd_putc(K);
    DIEZ=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(8,1);
    lcd_putc(K);
    UNI=VAL;
}
DELAY_MS(200);
POSICION_X=UNI+10*DIEZ+100*CIEN+1000*MIL+10000*DMIL;
PASOS_INI_X=POSICION_X/5;
}
VOID INICIAL_Y()
{
    //SE INGRESA POR TECLADO LA POSICION INICIAL Y
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))
    {
        LCD_GOTOXY(4,2);
    }
}

```



```

    lcd_putc(K);
    DMIL=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(5,2);
    lcd_putc(K);
    MIL=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(6,2);
    lcd_putc(K);
    CIEN=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(7,2);
    lcd_putc(K);
    DIEZ=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(8,2);
    lcd_putc(K);
    UNI=VAL;
}

```

```

    }
    DELAY_MS(200);
    POSICION_Y=UNI+10*DIEZ+100*CIEN+1000*MIL+10000*DMIL;
    PASOS_INI_Y=POSICION_Y/5;
}

```

```

VOID ENCODER_INI_X()
{
    //UBICA LA MESA EN POSICION INICIAL X
    X=0;
    X5=0;
    WHILE (X<PASOS_INI_X)
    {
        IF(!BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==1)
        {
            X++;
            C=0;
        }
        IF((BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==0)
        {
            X++;
            C=1;
        }
        IF ((CUADR=='1')||(CUADR=='4'))
        {
            BIT_SET(DIRECCION_X);
            set_pwm1_duty(20);
            LCD_GOTOXY(1,1);
            X5=5*X;
            PRINTF(LCD_PUTC,"X= %LU [um]",X5);

```

```

}
IF ((CUADR=='2')||(CUADR=='3'))
{
    BIT_CLEAR(DIRECCION_X);
    set_pwm1_duty(20);
    LCD_GOTOXY(1,1);
    X5=5*X;
    PRINTF(LCD_PUTC,"X=- %LU [um]",X5);
}
}
set_pwm1_duty(0);
}
VOID ENCODER_INI_Y()
{
    //UBICA LA MESA EN POSICION INICIAL Y
    Y=0;
    Y5=0;
    WHILE (Y<PASOS_INI_Y)
    {
        IF(!BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==1)
        {
            Y++;
            C=0;
        }
        IF((BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==0)
        {
            Y++;
            C=1;
        }
    }
    IF ((CUADR=='1')||(CUADR=='2'))

```

```

{
    BIT_SET(DIRECCION_Y);
    set_pwm2_duty(20);
    LCD_GOTOXY(1,2);
    Y5=5*Y;
    PRINTF(LCD_PUTC,"Y= %LU [um]",Y5);
}
IF ((CUADR=='3')||(CUADR=='4'))
{
    BIT_CLEAR(DIRECCION_Y);
    set_pwm2_duty(20);
    LCD_GOTOXY(1,2);
    Y5=5*Y;
    PRINTF(LCD_PUTC,"Y=- %LU [um]",Y5);
}
}
set_pwm2_duty(0);
}
VOID POSICION_INICIAL()
{
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("INGRESE POSICION");
    LCD_GOTOXY(1,2);
    LCD_PUTC("INICIAL EN [um]");
    DELAY_MS(5000);
    //INGRESA POSICION INICIAL EN EJE X
    INICIAL_X();
    //INGRESA POSICION INICIAL EN EJE Y
    INICIAL_Y();
}

```

```

WHILE ((POSICION_X>12000)||((POSICION_Y>12000))
{
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("RANGO MAXIMO");
    LCD_GOTOXY(1,2);
    LCD_PUTC("-12000:12000[um]");
    DELAY_MS(3000);
    INICIAL_X();
    INICIAL_Y();
}
// SE UBICA EN POSICION INICIAL EN EJE X
ENCODER_INI_X();
// SE UBICA EN POSICION INICIAL EN EJE Y
ENCODER_INI_Y();
}
VOID TAMANO_LINEA_X()
{
    //INGRESA POR TECLADO EL TAMAÑO DE LA LINEA HORIZONTAL (X)
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("INGRESE TAMAÑO");
    LCD_GOTOXY(1,2);
    LCD_PUTC("LINEA HORIZONTAL");
    DELAY_MS(3000);
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("LONG X=");
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))

```

```

{
    LCD_GOTOXY(11,1);
    lcd_putc(K);
    DIEZ=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(12,1);
    lcd_putc(K);
    UNI=VAL;
}
DELAY_MS(200);
LONG_LX_PASOS=UNI+10*DIEZ;
LONG_LX=LONG_LX_PASOS/5;
}
VOID TAMANO_LINEA_Y()
{
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("INGRESE TAMANO");
    LCD_GOTOXY(1,2);
    LCD_PUTC("LINEA VERTICAL");
    DELAY_MS(3000);
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("LONG Y=");
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))
{

```

```

    LCD_GOTOXY(10,1);
    lcd_putc(K);
    DIEZ=VAL;
}
TECLADO();
IF((k!='#')&&(k!='*'))
{
    LCD_GOTOXY(11,1);
    lcd_putc(K);
    UNI=VAL;
}
DELAY_MS(200);
LONG_LY_PASOS=UNI+10*DIEZ;
LONG_LY=LONG_LY_PASOS/5;
}
VOID DERECHA()
{
    BIT_CLEAR(DIRECCION_X);
    set_pwm1_duty(20);
    IF(!BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==1)
    {
        C=0;
        X++;
    }
    IF((BIT_TEST(ENCODER_X)&& C==0)
    {
        C=1;
        X++;
    }
}

```

```

VOID ABAJO()
{
    BIT_SET(DIRECCION_Y);
    set_pwm2_duty(20);
    IF(!BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==1)
    {
        C=0;
        Y++;
    }
    IF((BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==0)
    {
        C=1;
        Y++;
    }
}
VOID ARRIBA()
{

    BIT_CLEAR(DIRECCION_Y);
    set_pwm2_duty(20);
    IF(!BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==1)
    {
        C=0;
        Y++;
    }
    IF((BIT_TEST(ENCODER_Y)&& C==0)
    {
        C=1;
        Y++;
    }
}

```



```

}
VOID LONGITUD_AVANCE()
{
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("INGRESE NUMERO");
    LCD_GOTOXY(1,2);
    LCD_PUTC("DE LINEAS");
    DELAY_MS(3000);
    LCD_PUTC("\f");
    LCD_GOTOXY(1,1);
    LCD_PUTC("LINEAS=");
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))
    {
        LCD_GOTOXY(8,1);
        lcd_putc(K);
        CIEN=VAL;
    }
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))
    {
        LCD_GOTOXY(9,1);
        lcd_putc(K);
        DIEZ=VAL;
    }
    TECLADO();
    IF((k!='#')&&(k!='*'))
    {
        LCD_GOTOXY(10,1);

```

```

    lcd_putc(K);
    UNI=VAL;
}
DELAY_MS(200);
REPETICIONES=(100*CIEN)+(10*DIEZ)+(UNI);
REPETICIONES=REPETICIONES/2;
}
VOID MOVIMIENTO_HORIZONTAL_DER()
{
    LINEAX=LONG_LX; //(N)
    LINEAY=LONG_LY+1; //(M)
    LONG_TOTAL=REPETICIONES*LINEAX;
    WHILE (PASOS<REPETICIONES)
    {
        LONGY=0;
        Y=0;
        Y5=0;
        WHILE(LONGY<LINEAY)
        {
            ARRIBA();
            LONGY=Y;
        }
        set_pwm2_duty(0);
        LONGX=0;
        X=0;
        X5=0;
        WHILE(LONGX<LINEAX)
        {
            DERECHA();
            LONGX=X;

```

```

}
set_pwm1_duty(0);
LONGY=0;
Y=0;
Y5=0;
WHILE(LONGY<LINEAY)
{
  ABAJO();
  LONGY=Y;;
}
set_pwm2_duty(0);
LONGX=0;
X=0;
X5=0;
WHILE(LONGX<LINEAX)
{
  DERECHA();
  LONGX=X;
}
set_pwm1_duty(0);
PASOS++;
LCD_GOTOXY(9,2);
PRINTF(LCD_PUTC,"RT= %f ",REPETICIONES);
LCD_GOTOXY(1,2);
PRINTF(LCD_PUTC,"PASOS=%LU",PASOS);
}
}
MAIN()          //////////////////////////////////////////////////// EMPIEZA ////////////////////////////////////////
{

```

```

SET_TRIS_A(0B000011);
SET_TRIS_B(0B00000000);
SET_TRIS_C(0B11000000);
SET_TRIS_D(0B00000000);
SET_TRIS_E(0B000);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_ccp2(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_4, 127, 1);
C=0;
X=0;
Y=0;
X5=0;
Y5=0;
PORTB=0;
LCD_INIT();
PASOS=0;
// LLAMA FUNCION QUE BUSCA EL EXTREMO DE LA MESA EN EL EJE Y
SWITCHY();
// LLAMA FUNCION QUE A PARTIR DEL EXTREMO DE LA MESA SE UBICA EN EL
PUNTO Y=0
CERO_HORARIOY();
LCD_PUTC("\f");
// LLAMA FUNCION QUE BUSCA EL EXTREMO DE LA MESA EN EL EJE X
SWITCHX();
// LLAMA FUNCION QUE A PARTIR DEL EXTREMO DE LA MESA SE UBICA EN EL
PUNTO X=0
CERO_HORARIOX();
CUADR='0';
WHILE((CUADR=='0')||(CUADR=='5')||(CUADR=='6')||(CUADR=='7')||(CUADR=='8')||(C
UADR=='9')||(CUADR=='*')||(CUADR=='#'))

```

```
{  
CUADRANTE();  
}  
// INGRESA POSICION INICIAL Y SE UBICA  
POSICION_INICIAL();  
TAMANO_LINEA_Y();  
TAMANO_LINEA_X();  
LONGITUD_AVANCE();  
MOVIMIENTO_HORIZONTAL_DER();  
}
```