

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



SEP

"60 Años de Excelencia en Educación Tecnológica"

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

“SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO A BASE DE UN CONVERTIDOR INDUCTIVO-DIGITAL”

TESIS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Presenta:

Ing. José de Jesús Hernández Pino

Director de tesis:

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

Orizaba, Veracruz, México.

Enero de 2017.



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México
Teléfonos: (272) 7 24 40 96, (272) 7 24 40 16, (272) 7 24 45 79 Fax: (272) 7 25 17 28

e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.itorizaba.edu.mx



Agradecimientos:

A CONACYT por el apoyo económico recibido durante mis estudios a través de la beca.

Resumen

Este escrito presenta el diseño y desarrollo de un sistema de microposicionamiento a base de un convertidor inductivo-digital, el cual consta del propio convertidor y un mecanismo de accionamiento. El convertidor incluye un sensor de posición basado en la tecnología de sensado inductivo, se encuentran ciertas ventajas en el uso de esta tecnología sobre los sensores tradicionales, como son el bajo consumo de energía, sensado sin contacto, inmunidad a interferencias no conductivas, menor coste del sistema al no necesitar de imanes para el sensado ya que únicamente requiere el uso de una bobina en una PCB o en un substrato flexible, cuenta con una alta resolución micrométrica y a su vez, aplicable en diversos ambientes y aplicaciones. Dentro de la literatura se encuentran distintos sistemas micro-electromecánicos (por sus siglas en inglés, MEMS) haciendo uso de variados actuadores y métodos de detección de la posición. Por consiguiente, se trabajó con un método diferente para la detección de la posición que consiste en el fenómeno eléctrico de la corriente de Foucault para la detección de los objetivos metálicos próximos a la bobina de sensado.

Abstract

This paper presents the design and development of a microposition system based on an inductive-digital converter, which consists of the converter itself and a drive mechanism. The converter includes a position sensor based on inductive sensing technology, certain advantages are found using this technology over traditional sensors, such as the low power consumption, contactless sensing, immunity to non-conductive interferences, lower system costs, because there's no need to use magnets for sensing, since it only requires the use of a coil on a PCB or in a flexible substrate, it has high micrometric resolution and at the same time, applicable in different environments and applications. There are different micro-electromechanical systems (MEMS) in literature using various actuators and position detecting methods. Therefore, a different position detecting method was used, which consists of the eddy current's electrical phenomenon for the detection of the metal targets next to the sensing coil.

CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.6 ESTADO DEL ARTE.....	6
1.7 MARCO TEÓRICO	9
1.7.1 <i>Métodos Convencionales De Microposicionamiento</i>	9
1.7.2 <i>Actuadores De Estado Sólido</i>	13
1.7.3 <i>Sensores para sistemas micromecatrónicos</i>	18
1.7.4 <i>Sensor Inductivo y Circuitos de Corriente Alterna (CA)</i>	23
CAPITULO II. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA	30
2.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA PCB PARA LA ETAPA DE DETECCIÓN.....	30
2.1.1 <i>Calculo de Rp_MIN y RP_MAX para los registros</i>	31
2.1.2 <i>Capacitor de Filtro (Pines CFA y CFB)</i>	31
2.1.3 <i>Requerimientos de diseño para el convertidor inductivo-digital</i>	31
2.1.4 <i>Requerimientos de diseño para el circuito resonador</i>	34
2.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO	35
2.2.1 <i>Primer Prototipo del Mecanismo</i>	36
2.2.2 <i>Prototipo Final del Mecanismo del Sistema de Microposicionamiento</i>	39
2.2.3 <i>Control del Dispositivo Electromecánico</i>	42
2.3 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO.....	43
CAPITULO III. ANÁLISIS Y RESULTADOS	4544
3.1 PRUEBAS PRELIMINARES.....	4644
3.2 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	5149
3.3 RANGO DE ALCANCE	5250
3.4 RESOLUCIÓN MEDIBLE DEL CONVERTIDOR INDUCTIVO-DIGITAL.....	5351
CONCLUSIONES	5553
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5654

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN MECANISMO DE REDUCCIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR PRESIÓN HIDRÁULICA.	10
FIGURA 2. ILUSTRACIÓN DE UN MECANISMO DE POSICIONAMIENTO BASADO EN UN TORNILLO DE POTENCIA.	10
FIGURA 3. ILUSTRACIONES DE DISTINTOS MECANISMOS DE REDUCCIÓN DE DESPLAZAMIENTO UTILIZANDO LA ACCIÓN DE: (A) UN RESORTE CON DEFORMACIÓN CONSTANTE, (B) UN MECANISMO DE FLEXIÓN, Y (C) UNA CUÑA.	11
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN MOTOR DE BOBINA DE VOZ.	12
FIGURA 5. MICROPINZA FABRICADA POR EL CENTRO BERKELEY DE SENSORES Y ACTUADORES.	15
FIGURA 6. UN MICROENGRANAJE FABRICADO POR TÉCNICA DE LIGA.	16
FIGURA 7. TENSIONES INDUCIDAS POR CAMPO ELÉCTRICO EN (A) PIEZOELÉCTRICO Y (B) ELECTROESTRICTIVO.	17
FIGURA 8. MOTORES MICROULTRASÓNICOS DE UN RELOJ DE PULSERA.	18
FIGURA 9. DOS SISTEMAS INTERFEROMÉTRICOS: (A) LA CONFIGURACIÓN MICHELSON Y (B) LA CONFIGURACIÓN FABREY-PEROT.	19
FIGURA 10. ESTRUCTURAS BÁSICAS DE: (A) UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA, Y (B) UN POTENCIÓMETRO MAGNETORESISTIVO.	21
FIGURA 11. REPRESENTACION ESQUEMÁTICA DE: (A) LA ESTRUCTURA DE UN TRANSFORMADOR DIFERENCIAL, Y (B) UN SENSOR DE CORRIENTE EDDY.	22
FIGURA 12. CORRIENTES DE FOUCAULT EN UN MATERIAL CONDUCTOR.	27
FIGURA 13. DIAGRAMA A BLOQUES DE LA ETAPA DE DETECCIÓN.	30
FIGURA 14. DISEÑO DE PCB DEL CONVERTIDOR.	32
FIGURA 15. PRIMERA VARIANTE DE LA PCB DEL CONVERTIDOR.	32
FIGURA 16. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL CONVERTIDOR.	33
FIGURA 17. DISEÑO DE LA PCB TIPO SHIELD DEL CONVERTIDOR.	33
FIGURA 18. DISEÑO DEL CIRCUITO RESONADOR.	34
FIGURA 19. PCB DEL CIRCUITO RESONADOR.	35
FIGURA 20. DIAGRAMA A BLOQUES DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO.	36
FIGURA 21. BASE PARA EL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO.	36
FIGURA 22. SOPORTE DE APOYO PARA EL CABEZAL DEL TORNILLO MICROMÉTRICO.	37
FIGURA 23. COPLÉ DE SUJECIÓN TORNILLO-MOTOR.	37
FIGURA 24. BASE DEL MOTOR.	38
FIGURA 25. DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO.	38
FIGURA 26. BASE DEL SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO.	39

FIGURA 27. SOPORTE FRONTAL DEL MOTOR CON OREJAS PARA LAS VARILLAS DE AJUSTE.	40
FIGURA 28. SOPORTE DE APOYO PARA EL CABEZAL DEL TORNILLO MICROMÉTRICO Y LAS VARILLAS DE AJUSTE.	40
FIGURA 29. SOPORTE POSTERIOR DE APOYO PARA LAS VARILLAS DE AJUSTE.	41
FIGURA 30. SOPORTE DE APOYO PARA EL MODULO DEL CONVERTIDOR INDUCTIVO-DIGITAL.	41
FIGURA 31. DISEÑO DEL MECANISMO DEL SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO.	42
FIGURA 32. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL CONTROLADOR PARA EL MOTOR PASO A PASO.	43
FIGURA 33. SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO.	4443
FIGURA 34. GRÁFICA DE LA RELACIÓN DISTANCIA – RESISTENCIA, CON AJUSTE A FUNCIONES LOGÍSTICA Y EXPONENCIAL CRECIENTE.	4746
FIGURA 35. GRÁFICA DE LA RELACIÓN DISTANCIA – RESISTENCIA, CON AJUSTE POLINOMIAL Y FUNCIÓN DE BOLTZMANN.	5049
FIGURA 36. GRÁFICA DEL RANGO SUPERIOR E INFERIOR DEL CONVERTIDOR INDUCTIVO-DIGITAL.	5250
FIGURA 37. DESPLAZAMIENTOS CADA 10 μM POR MEDIO DEL TORNILLO MICROMÉTRICO.	5351

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE DESPLAZAMIENTOS DE VARIOS TIPOS DE ACTUADORES.	13
TABLA 2. NUEVOS ACTUADORES CLASIFICADOS DE ACUERDO AL PARÁMETRO DE ENTRADA.	14
TABLA 3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE MICRODESPLAZAMIENTOS EN SISTEMAS MICROMECASTRÓNICOS.	20
TABLA 4. PARÁMETROS BÁSICOS DE DISEÑO PARA EL CONVERTIDOR.	32
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR.	34
TABLA 6. EXTRACTO DE LAS LECTURAS DEL CONVERTIDOR INDUCTIVO-DIGITAL.	4645
TABLA 7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS LECTURAS DEL CONVERTIDOR.	4745
TABLA 8. PARÁMETROS DEL AJUSTE A UNA FUNCIÓN EXPONENCIAL CRECIENTE DE UN COEFICIENTE.	4947
TABLA 9. PARÁMETROS DEL AJUSTE A UNA FUNCIÓN DE RESPUESTA LOGÍSTICA.	4948
TABLA 10. PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL SISTEMA.	5048
TABLA 11. VALORES PARA LOS RANGOS DE ALCANCE DEL CONVERTIDOR.	5351
TABLA 12. VALORES PARA LA RESOLUCIÓN DEL CONVERTIDOR.	5452

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Desde 1960 se ha previsto la posibilidad de emplear manipuladores micro-robóticos para la fabricación “de abajo hacia arriba” (manipulación, ensamblado, etc.) de diminutas máquinas. La investigación en la micro-robótica progresó de estos conceptos aparentemente fuera de su época cuando en 1980 empezaron a surgir los sistemas microelectromecánicos. Siendo capaces de elaborar micromotores y micropinzas hechos de polisilicio fabricado en un chip de silicio. Más tarde, a finales de 1980 y principios de 1990, se publicaron propuestas sobre cómo desarrollar sistemas microelectromecánicos basados en dispositivos micro-robóticos utilizando los micromotores fabricados con anterioridad, así como otras oportunidades de aplicación [1].

Hoy en día se han logrado considerables avances para los sistemas de microposicionamiento, lo que ha permitido desplazamientos para posicionar y orientar objetos desde escalas milimétricas hasta micrométricas, e inclusive algunas investigaciones consiguen dichos posicionamientos en rangos nanométricos. Entre los avances mencionados se cuenta con nuevos y mejores materiales con propiedades específicas que cumplen con las funciones de accionamiento deseadas para estos sistemas; así como también en las técnicas de medición de los desplazamientos donde se han alcanzado mayores resoluciones en el desplazamiento y en su respuesta.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un sistema de microposicionamiento a base de un convertidor inductivo-digital. El diseño propuesto está integrado por dos etapas principales: la etapa de detección, en donde una bobina junto con un convertidor de inductancia servirá para determinar la posición; y una etapa de accionamiento, la cual consta de un mecanismo actuador por medio de tornillos micrométricos. El sistema es controlado mediante una interfaz gráfica que igualmente está diseñada para realizar diversas pruebas experimentales en donde se examine y evalúe el correcto funcionamiento de un prototipo.

1.2 Problemática

En los últimos años, un auge tecnológico por la manufactura de productos a micro-escala se ha impulsado no solo en la fabricación, sino también en la manipulación, donde diminutos pero precisos movimientos son los que hacen la diferencia. Campos como el de la electrónica, donde la fabricación de semiconductores, la manipulación de obleas, el ensamblado de circuitos integrados, requieren de este tipo de tecnología de precisión a escalas micro/nanométricas se ven beneficiados por sistemas cada vez más eficientes que cumplan con estas características.

Un sistema de microposicionamiento hace uso de actuadores, sensores de posición y articulaciones o eslabones para así poder lograr una mayor precisión y resolución en el desplazamiento. En la literatura se han descrito diferentes modelos de sistemas de microposicionamiento, algunos han sido exclusivamente de movimiento rotacional y otros de movimiento traslacional que, en combinación permiten gozar de un mayor número de grados de libertad con mayor resolución. De igual manera, existen modelos que hacen uso de distintos componentes para su fabricación, desde los propios materiales con los que están constituidos, hasta los sensores, actuadores y eslabones aplicados para su desarrollo. Particularmente, uno de los actuadores más frecuentemente usado en el diseño de los sistemas de microposicionamiento es el transductor piezoeléctrico debido a que ofrece una respuesta rápida y alta resolución, el cual, a pesar de las ventajas con las que cuenta normalmente exhibe histéresis (fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa), lo que se traduce en una no linealidad del comportamiento. En lazo abierto, la histéresis puede inducir un error de posición de entre el 10-15%.

De tal manera que el uso de los transductores piezoeléctricos conlleva algunas desventajas. Y para la elaboración de la presente tesis no resulta viable su adquisición, por lo que es considerado como uno de los principales problemas a resolver. Además, se pretende comprender el funcionamiento de un convertidor

inductivo-digital que servirá como sensor de posicionamiento ya que actualmente no es posible encontrar alguna aplicación del mismo para estos sistemas.

1.3 Justificación

Usualmente, los sistemas de mecanizado tradicionales son los encargados de la fabricación de productos a tamaños considerablemente pequeños. El uso de estos necesita de amplias áreas de trabajo, lo que ocasiona pérdidas sustanciales tanto económicas como de tiempo y espacio. Por lo que muchos investigadores han invertido esfuerzos en el desarrollo de sistemas para la fabricación de estos pequeños productos. Asimismo, la manipulación de precisión a escalas micrométricas para ciencias como la medicina o en el ensamblado de microcomponentes hacen necesarios sistemas de micro/nanoposicionamiento para lograr una implementación adecuada de la manipulación o la tarea de ensamblado, por ejemplo, en micropipetas o micropinzas. Como estos hay muchos otros más campos de aplicación que se benefician del diseño de sistemas de microposicionamiento gracias a las ventajas que implican sus pequeñas dimensiones, como son: alta precisión y resolución.

Con base en lo anterior se plantea el desarrollo de un sistema de microposicionamiento que cuente con un convertidor inductivo-digital como sensor de posición, el cual se basa en el fenómeno de inducción. La aplicación de dicho sensor en el proyecto es de importancia debido a las características que este presenta como sensor sin contacto, tecnología de sensado de corto alcance lo que permite un bajo costo, sensado de alta resolución de los objetivos conductivos en presencia de diversos factores propios de los entornos hostiles. En particular, la

tecnología de sensado inductivo hace posible una medida precisa de diferentes variables como son la posición lineal y angular, el desplazamiento, el movimiento, la compresión y vibración, la composición metálica de los materiales, entre otras diversas aplicaciones que se emplean en mercados incluidos el automotriz, de consumo, computacional, industrial, médico y comunicaciones.

Actualmente, dentro de la revisión bibliográfica no se cuenta con algún modelo de microposicionamiento que haya hecho uso del convertidor inductivo-digital, esto supondría un sistema novedoso, específicamente de la etapa de posicionamiento.

1.4 Hipótesis

Por medio de la aplicación de un convertidor inductivo-digital y la implementación de un mecanismo de accionamiento micrométrico es posible diseñar y desarrollar un sistema de microposicionamiento eficiente en términos de resolución y tiempo de respuesta.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de microposicionamiento ~~con~~ base a un convertidor inductivo-digital con el fin de mejorar el rendimiento y la confiabilidad debido al uso de tecnología de sensado inductivo, en términos de permitir resoluciones micrométricas, ~~dentro de la etapa de sensado del sistema.~~ permitiendo

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y fabricar la tarjeta de circuito impreso (PCB) de los dispositivos de montaje superficial, como son el convertidor y todos los demás elementos necesarios para su ejecución, encargados de la etapa de detección.
- Analizar el funcionamiento del convertidor inductivo-digital para establecer la comunicación a través del microcontrolador con el ordenador personal (PC) y así poder realizar las pruebas del comportamiento del sistema pertinentes.
- Diseñar e implementar al sistema un mecanismo micrométrico encargado del movimiento para la etapa de accionamiento.

1.6 Estado Del Arte

Los sistemas de microposicionamiento han sido ampliamente usados en la manipulación de precisión y en aplicaciones de ensamblado. Dentro de dichas aplicaciones se encuentran la alineación de sistemas paralelos, tecnologías de montaje superficial (SMT), ensamblado de circuitos integrados (IC), etc. Donde pequeños pero precisos movimientos son los que pueden mejorar el rendimiento significativamente. Para propósitos científicos y de ingeniería, el microposicionamiento es usado en investigación y producción como, por ejemplo, en los micromanipuladores a nivel celular, y para el ensamblado y producción de dispositivos, dentro de la electrónica los encontramos en la fabricación de semiconductores. Debido a la miniaturización en la electrónica, así como la demanda que el microposicionamiento ha logrado en los diferentes campos de aplicación son necesarios sistemas más eficientes. Hay varios materiales con diversas características y esquemas sobre los cuales se basa la elaboración de un sistema de microposicionamiento. Para mayor resolución y precisión, estos sistemas hacen uso de actuadores, sensores y uniones. Los actuadores electrostáticos pueden ser una buena opción si se requiere de un tamaño pequeño, fuerzas bajas y una alta frecuencia. [2]. Sin embargo, estos cuentan con un alcance limitado de desplazamiento y para su uso es necesario un alto voltaje.

Por el auge de los productos comerciales a micro-escala son necesarias microindustrias para fabricarlos y ensamblarlos sin las limitantes que un sistema de mecanizado tradicional acarrea como es el gran tamaño requerido para estos. Los mecanismos paralelos han mostrado ventajas en la precisión como en la velocidad de fabricación, por lo cual se han desarrollado extensamente. No obstante, cuentan con una escasa capacidad rotacional, la cual es una desventaja representativa de este tipo de mecanismos. Se ha desarrollado un control de doble servo para una plataforma de microposicionamiento con 3 grados de libertad (GDL) la cual cuenta con una capacidad de inclinación de más de 100° en su funcionamiento [3]. El sistema de doble servo consiste en tres servo-motores AC empleados para lograr una amplia área de trabajo con un alto ángulo de inclinación. También cuenta con

tres piezoactuadores que son usados para producir la precisión del movimiento de la plataforma de microposicionamiento propuesto a escala sub-micrométrica.

De acuerdo al tipo de movimiento, el microposicionamiento puede dividirse en dos tipos: posicionamiento traslacional y rotacional. En los dispositivos de microalineación y en los dispositivos ópticos, son requeridos sistemas de microposicionamiento capaces de un movimiento rotacional preciso. Usualmente es empleado el mecanismo de engranajes convencionales, pero estos mecanismos sufren de efectos adversos como el contragolpe, la fricción y el desgaste, lo que deteriora la precisión del posicionamiento del sistema. En orden de solventar estas deficiencias, mecanismos basados en bisagras de flexión pueden ser ocupados, los cuales entregan movimiento por hacer uso de la deformación elástica del material. Han diseñado una plataforma rotacional de amplio rango de trabajo (sobre 10°) y dimensiones compactas al mismo tiempo [4]. Específicamente, la plataforma es impulsada por un motor lineal de bobina (VCM) y el movimiento de salida es medido a lo largo por un sensor de desplazamiento laser con un cálculo triangular. En comparación con otros actuadores basados en materiales inteligentes como los actuadores piezoeléctricos (PSA), un VCM ofrece un amplio trazo al costo de una relativamente pequeña fuerza de bloqueo. Para el movimiento rotacional de precisión alrededor del centro de rotación es implementado un controlador de retroalimentación PID.

A partir del esquema de los mecanismos basados en flexión, un sistema de microposicionamiento XY desacoplado con un control adaptativo por modelo de referencia el cual es impulsado por actuadores electromagnéticos se ha presentado[5,6]. Hay muchas ventajas asociadas a los actuadores electromagnéticos en términos de no contaminación, baja o nula fricción, respuesta rápida, alcance amplio de desplazamiento y bajo costo. Los resultados experimentales verifican el proceso para la etapa de microposicionamiento, el controlador diseñado cumple el rendimiento esperado. Aunque el controlador rastrea bien la referencia, el campo de aplicación de esta plataforma de microposicionamiento será limitada.

Para lograr un posicionamiento en tres dimensiones, se ha diseñado una estructura de bisagras flexibles[7]. El uso de bisagras flexibles en comparación con las articulaciones mecánicas convencionales se traduce en un movimiento de alta precisión ya que tiene las ventajas de no presentar contragolpe, pérdidas por fricción, aunado a que no necesita de lubricación o ensamblado y es de fácil fabricación. Esta plataforma está construida con seis amplificadores paralelos de un solo eje. El estudio ha tenido como objetivo que su diseño cuente con una gran amplificación en un mínimo volumen del mecanismo.

Una diversidad de aplicaciones dentro de la ingeniería de precisión necesita de un aislamiento del proceso debido a la vibración del entorno. Estas perturbaciones son originadas por los múltiples grados-de-libertad (GDL) que se encuentran en ciertos mecanismos. Con el objetivo de solventar esta necesidad se ha desarrollado un manipulador paralelo con el uso de bisagras de flexión[8]. Este sistema puede lograr 3-GDL con aislamiento activo de la vibración, para lo cual se ha aplicado un control mediante el método H₂.

Los actuadores piezoeléctricos son empleados en sistemas de microposicionamiento en donde es necesario un movimiento de ultra alta precisión dentro de espacios de trabajo a micro-escala. Por otra parte, el uso de este tipo de actuadores conlleva la desventaja de la no linealidad de histéresis. Por lo que se han propuesto varios métodos para compensar estos efectos[9-11]. De acuerdo a estos métodos, se pueden clasificar en dos grupos, en donde el primero de ellos ocupa un compensador de histéresis en base a un modelo de inversión[9]. En tanto que en el segundo se pueden clasificar aquellos que hacen uso de diferentes controladores, tales como el PID, controladores adaptativos por modelo de referencia, control con modo deslizante, entre otros[10,11].

1.7 Marco Teórico

A continuación, se mencionan algunas de las metodologías tradicionales por las que se implementan sistemas de microposicionamiento, así como una clasificación de las mismas con las características adyacentes que hacen posible la realización de sistemas a microescala. Dichas características como la fuerza generativa, la precisión y el tiempo de respuesta son importantes ya que en ellas se basa el funcionamiento de los mismos. Además, se muestra un panorama actual de los diferentes tipos de actuadores aplicados a sistemas micromecatrónicos y, de igual importancia, un estudio acerca de las técnicas ocupadas en los sensores de estos sistemas que son aprovechados para dispositivos de microposicionamiento. Por último, se profundizará en el fenómeno de la inducción electromagnética, en especial el que hace uso del sensor de inducción, así como los circuitos de corriente anexos al fenómeno.

1.7.1 Métodos Convencionales De Microposicionamiento

Los métodos convencionales de microposicionamiento por lo general incluyen mecanismos de reducción de desplazamiento para suprimir el juego mecánico, los cuales están categorizados dentro de tres grupos principales: 1) Mecanismos de reducción de desplazamiento por presión hidráulica/neumática, 2) Combinación de un motor y un mecanismo de reducción del desplazamiento, y 3) Motores de bobina de voz [12].

1) Mecanismos de reducción de desplazamiento por presión hidráulica/neumática.

Estos mecanismos generalmente reducen el desplazamiento de salida con respecto al de entrada cambiando el diámetro del cilindro por donde pasa el fluido. Dispositivos que usan este tipo de mecanismo son usualmente grandes y tienen respuestas lentas. Los actuadores de este tipo algunas veces son usados en modo inverso para amplificar el desplazamiento producido por un actuador de estado

sólido. En la Figura 1 se observa el principio de funcionamiento de estos mecanismos.

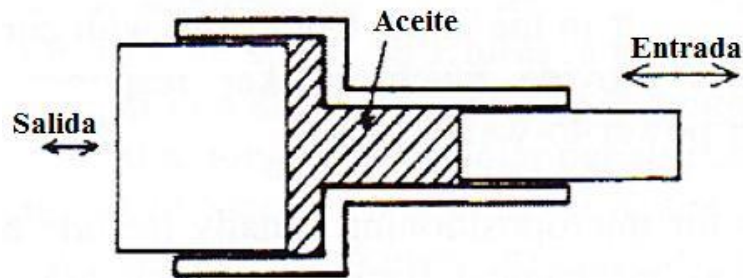


Figura 1. Representación esquemática de un mecanismo de reducción de desplazamiento por presión hidráulica.

2) *Combinación de un motor y un mecanismo de reducción de desplazamiento.* Normalmente, el movimiento angular del motor es transformado a desplazamiento lineal a través de una tuerca y un tornillo de potencia, en la Figura 2 es representado un mecanismo de este tipo. Si se incorporan cojinetes o rodamientos muy precisos, se pueden obtener posicionamientos de menos de 5 μm en un rango de 100 mm. Cuando mayores precisiones son requeridas, mecanismos adicionales de reducción de desplazamiento son necesarios.

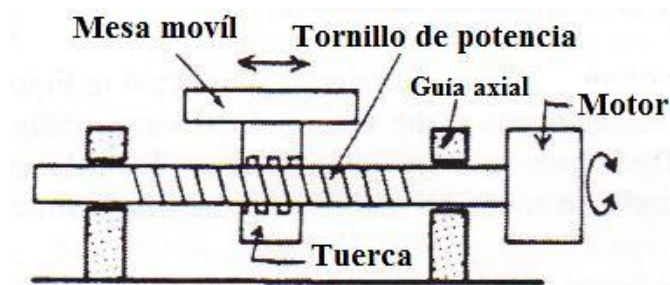


Figura 2. Ilustración de un mecanismo de posicionamiento basado en un tornillo de potencia.

Hay varios mecanismos comúnmente usados de reducción del desplazamiento. En la Figura 3 se muestra la acción de un resorte con deformación constante, un mecanismo de flexión, y una cuña.

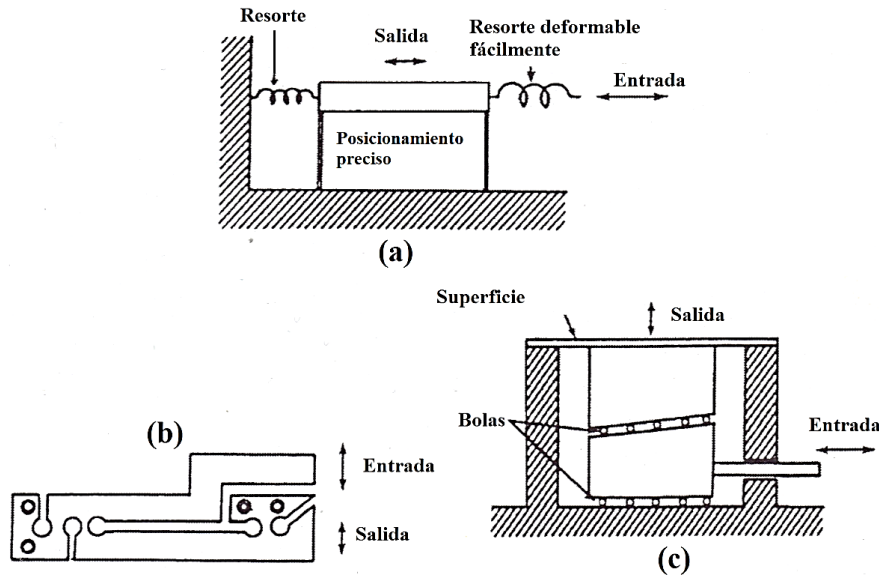


Figura 3. Ilustraciones de distintos mecanismos de reducción de desplazamiento utilizando la acción de: (a) un resorte con deformación constante, (b) un mecanismo de flexión, y (c) una cuña.

La combinación de un motor con un tornillo o un mecanismo de reducción de desplazamiento tienen las ventajas de una respuesta rápida, una fuerza generativa sustancial, y una buena capacidad de control, pero es difícil de fabricar una forma en miniatura debido a la complejidad estructural. Además, las tolerancias de fabricación de un tornillo de transferencia típico tienden a provocar el juego mecánico en el posicionamiento incluso cuando mecanismos de reducción de desplazamiento son implementados.

3) Motores de bobina de voz.

Los motores de bobina de voz generan un movimiento de deslizamiento debido al campo magnético que se produce cuando fluye la corriente por la bobina. A pesar de que este tipo de motores logran desplazamientos más precisos en comparación con los vistos anteriormente, requieren de una gran entrada de alimentación eléctrica, su respuesta es lenta, y producen fuerzas generativas algo bajas. La estructura de un motor de bobina de voz es mostrada en la Figura 4.

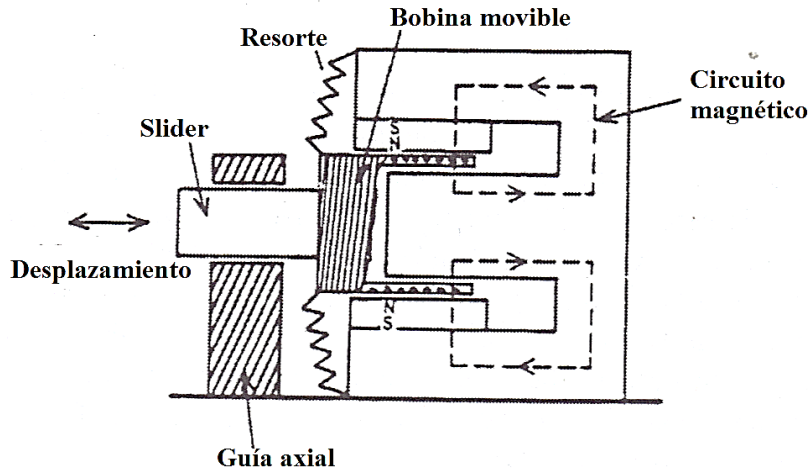


Figura 4. Representación esquemática de un motor de bobina de voz.

Una clasificación de varios tipos de actuadores es presentada en la Tabla 1. Esta clasificación está basada en las características de los actuadores que se relacionan con la capacidad de control en el microposicionamiento. Los controlados eléctricamente son preferidos generalmente para aplicaciones donde dispositivos miniatura son necesitados. Dentro de la tabla se muestran algunas especificaciones relevantes de los actuadores de estado sólido. Al final de la tabla se observa un grupo, perteneciente a los nuevos actuadores, los cuales respecto a los dispositivos convencionales presentan respuesta mucho más rápida, menor tamaño, resolución más alta, y una mayor relación potencia-peso.

Impulso	Dispositivo	Desplazamiento	Precisión	Torque/ Fuerza generativa	Tiempo de respuesta
Presión neumática	Motor	Rotacional	Grados	50 Nm	10 seg.
	Cilindro	100 mm	100 μ m	10^{-1} N/mm ²	10 seg.
Presión hidráulica	Motor	Rotacional	Grados	100 Nm	1 seg.
	Cilindro	1000 mm	10 μ m	100 N/mm ²	1 seg.
Electricidad	Servomotor AC	Rotacional	Minutos	30 Nm	100 mseg.
	Servomotor DC	Rotacional	Minutos	200 Nm	10 mseg.

Motor a pasos	1000 mm	10 μm	300 N	100 mseg.
Motor de bobina de voz	1 mm	0.1 μm	300 N	1 mseg.
Piezoeléctrico	100 μm	0.01 μm	30 N/mm ²	0.1 mseg.
Magnetostrictivo	100 μm	0.01 μm	100 N/mm ²	0.1 mseg.
Motor ultrasónico (piezoeléctrico)	Rotacional	Minutos	1 Nm	1 mseg.

Tabla 1. Características de desplazamientos de varios tipos de actuadores.

1.7.2 Actuadores De Estado Sólido

La búsqueda por nuevos actuadores de estado sólido que no usen resortes o mecanismos de engranaje se ha desarrollado en los últimos años para proporcionar de manera más eficaz y fiable los desplazamientos requeridos para aplicaciones de microposicionamiento. A continuación se presenta una revisión de la tecnología actual referente a los actuadores de estado sólido [13].

a) Actuadores inteligentes

Los materiales piroeléctricos y piezoeléctricos, los cuales generan un campo eléctrico con la entrada de calor y presión, respectivamente, son llamados materiales inteligentes. De la misma manera tienen efectos inversos, de modo que ambas funciones de “sensado” y “accionamiento” pueden ser realizadas en el mismo material.

Los materiales inteligentes deben poseer un “impulso/control” o función de “transformación”, que es adaptativa a cambios en las condiciones ambientales además de sus funciones de actuador y sensor. Dado que los materiales ferroeléctricos pueden presentar efectos fotostrictivos, el fotovoltaje producido inducirá una tensión en el cristal. Por consiguiente, este tipo de material generara una tensión de excitación dependiente de la intensidad de la luz incidente, que acciona una respuesta mecánica.

b) Nuevos actuadores

La mayoría de los nuevos actuadores son fabricados de algún tipo de material sólido con propiedades específicamente adaptadas para optimizar la función de accionamiento deseada.

El desplazamiento de un elemento actuador debe ser controlado por cambios en un parámetro externo tales como temperatura, campo magnético o eléctrico. Los actuadores activados por cambios en la temperatura generalmente operan a través de la expansión térmica o la dilatación asociada con una transición de fase, como las transformaciones ferroeléctricas y martensíticas.

En la Tabla 2 se presentan algunos nuevos actuadores recientemente desarrollados clasificados en términos de su parámetro de entrada.

Parámetro de Entrada	Tipo de Actuador/Dispositivo
Campo Eléctrico	Piezoeléctrico/Electrostrictivo Electroestático (Silicio MEMS) Fluido Electrorreológico
Campo Magnético	Magnetostrictivo Fluido Magnetorreológico
Presión/Esfuerzo	Rubbertuator (Actuador neumático)
Calor	Aleación con Memoria de Forma Chorro de Burbujas
Luz	Fotostrictivo Manipulador de Luz Laser
Químico	Mecanoquímico Hidruro de Metal

Tabla 2. Nuevos actuadores clasificados de acuerdo al parámetro de entrada.

Las características generales deseadas para un elemento actuador incluyen:

- 1) gran desplazamiento (sensibilidad = desplazamiento / potencia de impulso),

- 2) buena reproducibilidad del posicionamiento (baja histéresis),
- 3) respuesta rápida,
- 4) características de temperatura estables,
- 5) baja energía de conducción,
- 6) gran fuerza generativa,
- 7) tamaño pequeño y peso ligero,
- 8) baja degradación / envejecimiento por uso,
- 9) mínimos efectos ambientales perjudiciales (ruido mecánico, ruido electromagnético, generación de calor, etc.)

c) *MEMS: Sistemas Microelectromecánicos*

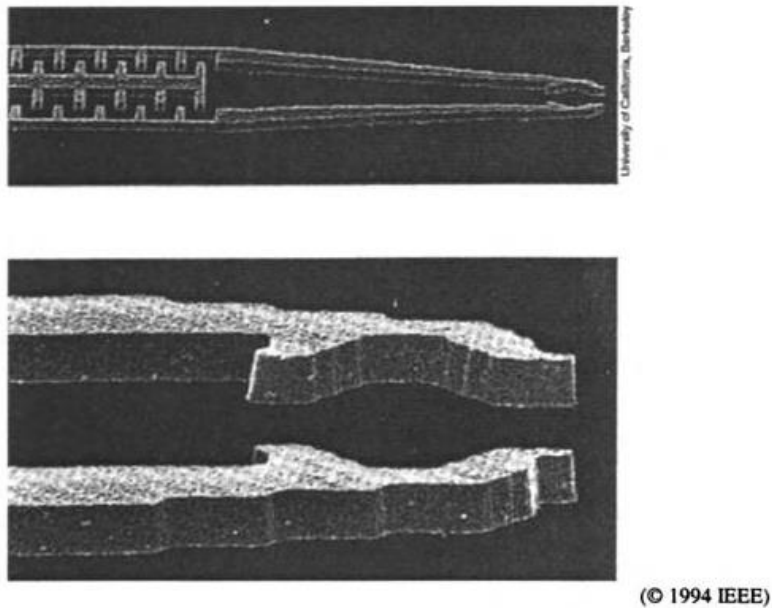


Figura 5. Micropinza fabricada por el Centro Berkeley de Sensores y Actuadores.

Gracias a las favorables propiedades mecánicas del silicio, se ha micromecanizado para crear sistemas electromecánicos (MEMS). Las técnicas para el micromecanizado del silicio han sido desarrolladas a través de los años en una variedad de industrias para una amplia gama de aplicaciones. Los sensores de presión y aceleración son producidos para aplicaciones en la instrumentación médica y los automóviles. Por citar un ejemplo, el sensor de aceleración usado para

disparar una bolsa de aire en un accidente automovilístico. Los niveles de fuerza generativa/desplazamiento producidos por dispositivos MEMS son, sin embargo, generalmente muy pequeños para ser útiles en muchas otras aplicaciones.

Existe una diversidad de técnicas para los procesos de micromecanizado, de los cuales se pueden producir estructuras a una escala de unos cientos de micrómetros, tales como la micropinza que aparece en la Figura 5. Esta micropinza fue fabricada por el Centro Berkeley de Sensores y Actuadores en California.

Hace no mucho tiempo procesos como el micromecanizado superficial, la unión por fusión de silicio, y la LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) emergieron como principales técnicas de fabricación. En la Figura 6 se observa un microengranaje hecho de polioximetileno (POM) fabricado a partir de un proceso de LIGA.

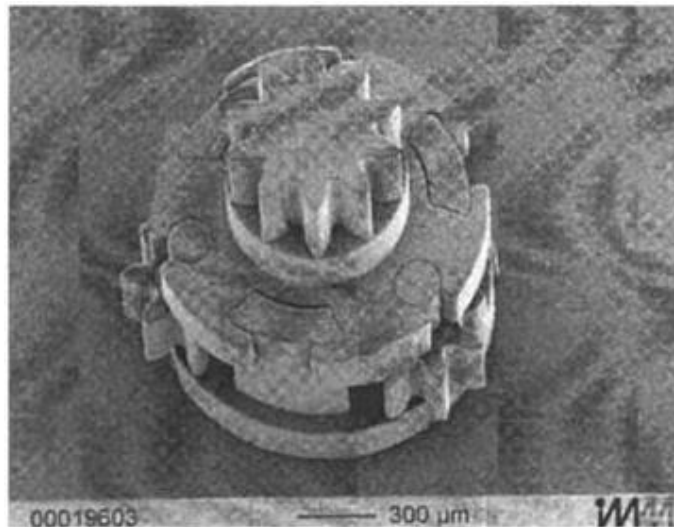


Figura 6. Un microengranaje fabricado por técnica de LIGA.

d) Actuadores Piezoeléctricos/Electrostrictivos

Cuando un campo eléctrico es aplicado a un material aislante, se inducirá presión en el material ya sea a través del efecto piezoeléctrico, de electrostricción, o una combinación de los dos. El efecto piezoeléctrico inverso es un efecto

electromecánico primario, donde la presión inducida es proporcional al campo eléctrico aplicado, mientras que el efecto electrostrictivo es un fenómeno secundario, por lo cual la tensión inducida es proporcional al cuadrado del campo aplicado.

Dentro de las curvas de tensión inducida por campo eléctrico, Figura 7, la respuesta piezoeléctrica muestra la deformación característica lineal frente a la relación de campo con una notable histéresis, mientras que la respuesta electrostrictiva no exhibe histéresis y una relación no lineal entre la tensión inducida y el campo eléctrico aplicado. Debido a este comportamiento no lineal, un sofisticado circuito de accionamiento es generalmente necesitado para los actuadores electrostrictivos.

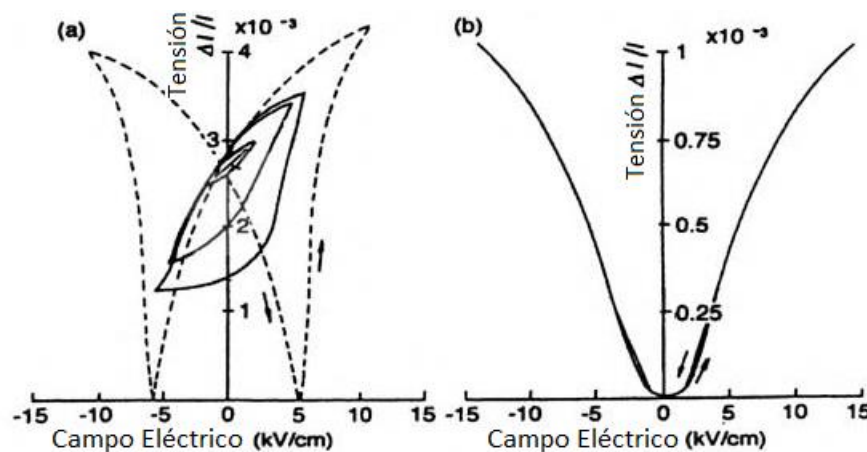


Figura 7. Tensiones inducidas por campo eléctrico en (a) piezoeléctrico y (b) electrostrictivo.

Los motores ultrasónicos piezoeléctricos también han sido desarrollados intensivamente. Industrias de componentes electrónicos se han centrado en el desarrollo de estos dispositivos, principalmente porque los motores piezoeléctricos ofrecen distintas ventajas como una eficiencia superior, tamaño miniatura (5-8 mm) y facilidad de fabricación sobre motores electromagnéticos convencionales. En la Figura 8 se observa un motor microultrasónico desarrollado y comercializado por Instrumentos Seiko, Japón, para aplicaciones de reloj de pulsera. El motor de 8 mm

de diámetro es usado como una alarma silenciosa, y el motor de 4 mm de diámetro es parte del mecanismo de cambio de fecha.

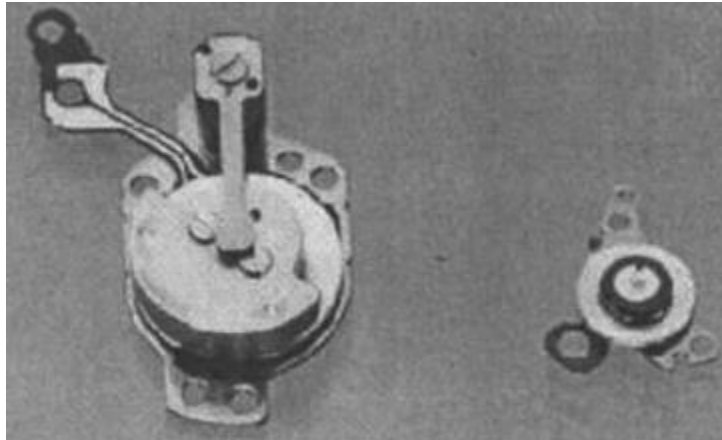


Figura 8. Motores microultrasónicos de un reloj de pulsera.

1.7.3 Sensores para sistemas micromecatrónicos

Normalmente, los actuadores de estado sólido son implementados junto a sensores de desplazamiento o de presión en sistemas de microposicionamiento. La detección precisa del desplazamiento es una parte importante de muchos sistemas de control/accionamiento, en particular para los sistemas servo de desplazamiento. Las técnicas para la medición del desplazamiento a microescala se clasifican dentro de dos categorías generales: técnicas ópticas (palanca óptica, rejilla óptica, interferometría y sensores ópticos) y eléctricas (resistencia, métodos de capacitancia e inducción electromagnética)[13].

1.7.3.1 Técnicas Ópticas

Efectos como la expansión térmica producen pequeños desplazamientos los cuales pueden ser medidos por medio de palanca óptica, la cual básicamente consiste en una fuente láser y un espejo. El desplazamiento de la muestra es transformado por la rotación del espejo y este, a su vez, es detectado por la deflexión del haz láser reflejado. Para mediciones precisas de la deflexión son necesarios sensores ópticos lineales, estos producen una señal eléctrica directamente proporcional a la posición del haz. La resolución de estos sistemas está determinada por la longitud de la

trayectoria del haz láser y la respuesta en frecuencia depende de la resonancia mecánica del mecanismo de espejos.

Junto a los interferómetros es comúnmente encontrar sensores de fibra óptica o bancos ópticos. En los cuales, dos o más haz de luz monocromáticos y coherentes con la misma longitud de onda y superpuestos formaran una interferencia o patrón de “franjas” que dependerá de la diferencia de fases y la trayectoria óptica entre los “brazos” del sistema interferométrico. Sistemas de doble haz, como la configuración Michelson representada en la Figura 9 (a), y sistemas de haz múltiples, tal como la configuración Fabrey-Perot observada en la Figura 9 (b), pueden ser empleadas para la detección de desplazamientos a microescala. Mediciones precisas en los cambios de la intensidad de luz hacen posible detectar desplazamientos menores a 1 nm por medio de estos sistemas.

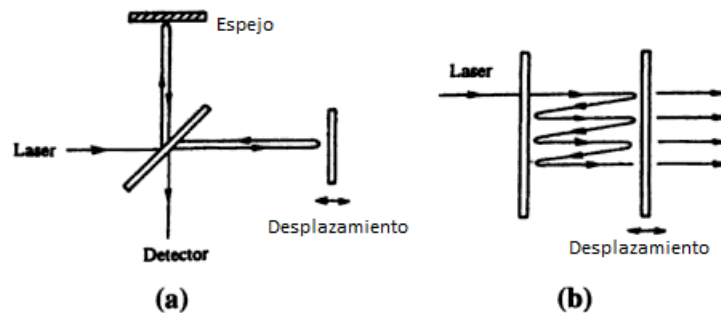


Figura 9. Dos sistemas interferométricos: (a) la configuración Michelson y (b) la configuración Fabrey-Perot.

Un resumen de las técnicas de medición de desplazamientos con algunas de sus características aparece en la Tabla 3.

Principio	Método	Resolución	Respuesta
Resistencia	Galga extensiométrica:		
	Metal	$\Delta l/l = 10^{-6}$	10 MHz
	Semiconductor	$\Delta l/l = 10^{-8}$	10MHz
	Potenciómetro:		
	Contacto	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	100 kHz

	Sin contacto	$\Delta l = 10^{-3} \mu\text{m}$	1 kHz
Inducción	Transformador Diferencial:		
Electromagnética	AC	$\Delta l = 10^{-2} \mu\text{m}$	100 Hz
	DC	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	100 Hz
	Corriente Eddy	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	50 kHz
Óptica	Palanca Óptica	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	1 kHz
	Fibra Óptica	$\Delta l = 10^{-2} \mu\text{m}$	100 kHz

Tabla 3. Técnicas de medición de microdesplazamientos en sistemas micromecatrónicos.

1.7.3.1 Técnicas Eléctricas

Métodos de Resistencia

Las galgas extensiométricas se usan a menudo para medir deformaciones y tienen una resolución de 10^{-6} . Por lo general, se unen a la muestra con una resina apropiada. Cuando la muestra se deforma, la resistencia de la galga cambiara. Para medir con precisión el cambio de la resistencia es necesario un puente de Wheatstone. Este cambio se debe actualmente a dos efectos: al cambio en el tamaño de la muestra y al efecto piezoresistivo. La respuesta en frecuencia de la galga extensiométrica es bastante amplia, de tal modo que mediciones tan altas como 10 MHz son posibles. La estructura básica de este dispositivo es representada esquemáticamente en la Figura 10 (a).

De acuerdo a la resistencia se puede monitorear la posición por medio de potenciómetros de contacto. Hay dos tipos de sensores potenciómetros: el detector de posición lineal y de posición angular. La resolución de estos dispositivos está limitada por el espesor del alambre resistivo helicoidal, el cual está alrededor de los 10 μm . Los nuevos dispositivos hacen uso de un polímero conductor continuo y logran resoluciones de 0.1 μm y una respuesta de 100 kHz.

En tanto que los potenciómetros sin contacto funcionan a través del efecto magnetoresistivo, por el cual ciertos materiales semiconductores exhiben un gran cambio de resistencia con la aplicación de un campo magnético. Estos sensores ofrecen una resolución de hasta $10^{-3} \mu\text{m}$ y tienden a tener una larga vida útil ya que no están en contacto con elementos móviles, lo que elimina los problemas por desgaste. En la Figura 10 (b) se muestra la estructura básica de un potenciómetro sin contacto.

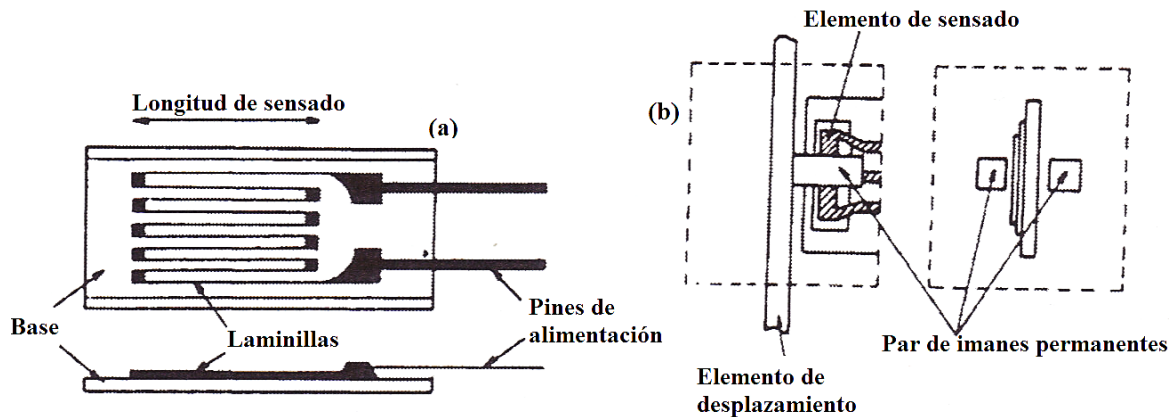


Figura 10. Estructuras básicas de: (a) una galga extensiométrica, y (b) un potenciómetro magnetoresistivo.

Métodos de Capacitancia

La capacitancia de un condensador de placas paralelas lleno de aire cambia linealmente respecto a la distancia entre las placas. Con el uso de un dilatómetro (instrumento para la medición de los cambios de dimensión en diversos materiales de acuerdo a un diferencial de temperatura), basado en este principio y utilizando un puente de capacitancia es posible lograr una resolución en el desplazamiento de hasta 10^{-3} \AA .

Métodos de Inducción Electromagnética

Compuesto por dos bobinas electromagnéticas idénticas y un núcleo magnético, que está unido al vástago del monitor. En donde cualquier cambio en la posición del

núcleo magnético resultará en un cambio en las inductancias mutuas de las dos bobinas, lo que generará una diferencia en los voltajes inducidos, esta diferencia se procesará y la señal obtenida se traducirá en el desplazamiento correspondiente. Por lo anterior, este dispositivo recibe el nombre de transformador diferencial. Sensores de este tipo tienen resoluciones de $1 \mu\text{m}$, pero se pueden lograr resoluciones del orden de $10^{-2} \mu\text{m}$ con los correspondientes acondicionadores de señal. La velocidad de respuesta está limitada sobre los 100 Hz por la frecuencia del voltaje de entrada AC y la resonancia mecánica, la cual se determina por la masa del núcleo. Una representación de este dispositivo se visualiza en la Figura 11 (a).

Hay dos tipos de sensores basados en las corrientes Eddy: el sensor de una sola bobina, en donde la bobina detecta el cambio en la inductancia, y el sensor de triple bobina, por medio de dos bobinas secundarias se detecta la corriente Eddy generada por una bobina primaria. La resolución y respuesta para este método son de $0.1 \mu\text{m}$ y 50 kHz respectivamente. Un sensor de este tipo se ilustra en la Figura 11 (b).

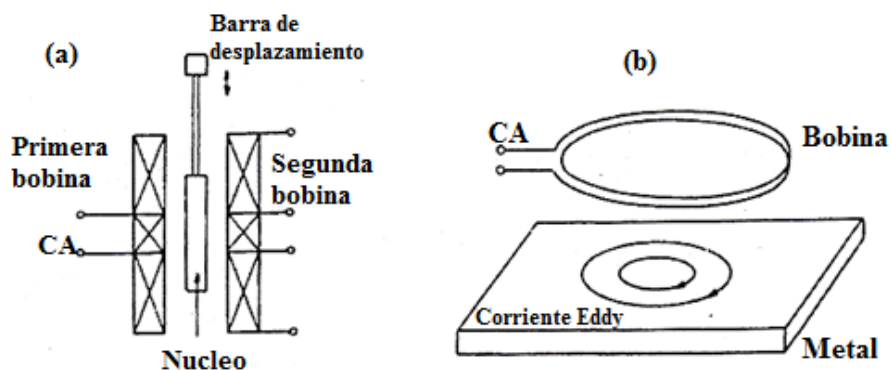


Figura 11. Representación esquemática de: (a) la estructura de un transformador diferencial, y (b) un sensor de corriente Eddy.

1.7.4 Sensor Inductivo y Circuitos de Corriente Alterna (CA)

Una vez sentadas las bases de los efectos producidos por el fenómeno de la inducción electromagnética se describirá el principio de funcionamiento del sensor inductivo por medio de corrientes Eddy.

Casi toda la energía eléctrica se produce en generadores que emplean la inducción electromagnética y, por consiguiente, su resultado es corriente alterna. Una de las razones más importantes por las que se utiliza la CA en forma tan universal es que la alternancia de la corriente produce efectos electromagnéticos que se aprovechan en una gran variedad de dispositivos. A continuación, se describirán algunos principios básicos de los circuitos de CA, así como los fenómenos resonantes propios de este tipo de circuitos[14].

1.7.4.1 Reactancia capacitiva

Cuando se excita un condensador con una fuente de voltaje alterno se limita la corriente, pero no impide por completo el flujo de la carga. Esto se debe a que el condensador se carga y descarga alternativamente, conforme la corriente y el voltaje se invierten cada medio ciclo.

Se le llama reactancia capacitiva a la oposición del paso de la corriente por parte del condensador (X_c). En un circuito de ca, se determina de la siguiente manera:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ donde}$$

X_c = Reactancia capacitiva (Ω o s/F),

C = Capacitancia (farads),

f = Frecuencia (Hz).

Recordando que, la capacitancia es la carga almacenada por volt ($C = Q/V$). Es decir, cuanto mayor sea la capacitancia habrá más carga en el condensador. Incrementar la capacitancia representa menor oposición al flujo de carga (esto es, una reactancia capacitiva reducida) a una frecuencia determinada.

Cuanto mayor sea la frecuencia del voltaje, menos tiempo será el requerido para el proceso de carga en cada ciclo. Un tiempo de carga menor equivale a que menos carga se acumula en las placas, por lo que habrá menor oposición a la corriente. Incrementar la frecuencia da por resultado una disminución en la reactancia capacitiva. Por lo tanto, la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia y a la capacitancia.

1.7.4.2 Reactancia Inductiva

La inductancia es una medida de la oposición que presenta un elemento de circuito al paso de una corriente variable en el tiempo (de acuerdo con la Ley de Lenz). Cuando una bobina de alambre, llamada inductor, se coloca en un circuito de corriente variable en el tiempo desarrolla un voltaje inverso, o contra fem, que se opone a la corriente que cambia. La corriente variable y que pasa por la bobina produce un campo y un flujo magnético cambiantes. Como la contra fem se produce en el inductor en consecuencia de su propio campo magnético cambiante, es un fenómeno conocido como autoinducción.

Se le conoce como reactancia inductiva (X_L) a la oposición que presenta un inductor a la corriente, en condiciones de ca depende del valor de la inductancia y de la frecuencia del voltaje.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \text{ donde}$$

X_L = Reactancia inductiva (Ω o H/s),

f = Frecuencia del voltaje impulsor (Hz),

L = Inductancia (H).

La reactancia inductiva es proporcional a la inductancia de la bobina y a la frecuencia de la fuente de voltaje. La inductancia de una bobina es una propiedad que depende de la cantidad de vueltas, del diámetro y la longitud de la misma, y del material de su núcleo (en caso de tenerlo). La frecuencia de la fuente de voltaje interviene en el cambio del flujo magnético, ya que en cuanto más rápidamente cambie la corriente en la bobina mayor será la rapidez de cambio de este. Esto implica una fem (contra fem o fem inversa) autoinducida mayor, que se opone a los cambios en la corriente.

1.7.4.3 Impedancia

En un diagrama de fase, método gráfico empleado para determinar la oposición general a la corriente en un circuito, la resistencia y las reactancias se les atribuyen propiedades semejantes a las de los vectores, y sus magnitudes se representan mediante flechas llamadas fasores.

La suma fasorial es la oposición efectiva, o neta, a las corrientes; a eso se le llama impedancia (Z). Si se combinan los componentes verticales (las reactancias inductivas y capacitivas) se obtiene la reactancia total, $X_L - X_C$. La impedancia general de un circuito RLC viene dada por la suma fasorial de la resistencia y la reactancia total. Aplicando el teorema de Pitágoras en el diagrama de fase se tiene:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \text{ impedancia de un circuito RLC en serie}$$

El ángulo de fase (ϕ) entre el voltaje de la fuente y la corriente en el circuito es el que forman el fasor de impedancia general (Z) y el eje +x, es decir:

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R}, \text{ ángulo de fase en un circuito RLC en serie}$$

1.7.4.4 Resonancia

Cuando el factor de potencia ($\cos \phi = R/Z$) de un circuito RLC en serie es igual a la unidad, al circuito se le transfiere la frecuencia máxima. A esta única frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva se anulan efectivamente (iguales en magnitud y desfasadas 180° , o lo contrario).

Esta frecuencia satisface la condición de impedancia mínima y, por consiguiente, maximiza la corriente en el circuito. Se le denomina frecuencia de resonancia:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

1.7.4.5 Circuitos osciladores

Si la resistencia en un circuito RLC es muy pequeña, ese circuito es, en esencia, un LC. En este tipo de circuitos la energía oscila a una frecuencia dada, que es la frecuencia natural del circuito, y que también es su frecuencia de resonancia. Cualquier perturbación resistiva en el circuito disiparía energía. Sin embargo, en un circuito LC ideal sin resistencia, la oscilación continuaría de forma indefinida. A medio ciclo de carga del condensador, la energía se convierte de magnética a eléctrica y viceversa. Los electrones que oscilan en el conductor emiten radiación electromagnética a la frecuencia de oscilación del circuito.

Tienen su aplicación en circuitos electrónicos donde es necesario hacer oscilar corrientes eléctricas a altas frecuencias, por ejemplo, en la generación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia que se usan en las comunicaciones de radio y televisión.

1.7.4.6 Principio de Funcionamiento del Sensor Inductivo

El principio de funcionamiento se fundamenta en las corrientes Eddy, también llamadas corrientes de Foucault, aplicado en sensores sin contacto; cuando una placa de metal se aproxima a una bobina por donde fluye una corriente alterna, una corriente Eddy con un flujo en forma de anillo se inducirá en la placa de metal, esto es debido a la Ley de Inducción de Faraday. El flujo magnético de la corriente Eddy interactúa con ella de la bobina, disminuyendo la inductancia de esta. En la Figura 12 se representa este fenómeno, donde L_s es la inductancia de la bobina y R_s es la resistencia parásita en serie de la misma. $L(d)$ representa la inductancia y $R(d)$ la resistencia parásita, ambas acopladas al material conductor y en función de la distancia (d).

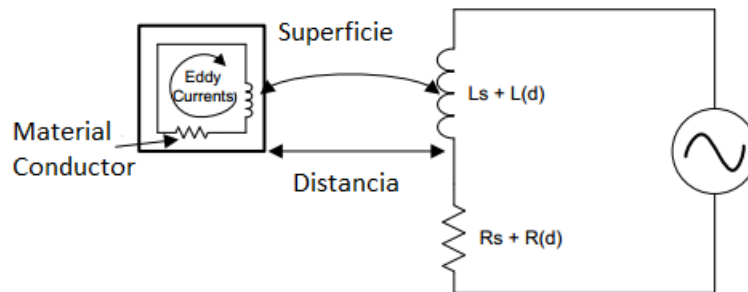


Figura 12. Corrientes de Foucault en un material conductor.

Las corrientes de Foucault fluyen en lazos cerrados dentro de los conductores, en planos perpendiculares al campo magnético. Pueden ser inducidos dentro de los conductores estacionarios cercanos por un campo magnético variable en el tiempo creado por un electroimán o transformador de CA, por ejemplo, o por movimiento relativo entre un imán y un conductor cercano. La magnitud de la corriente en un bucle dado es proporcional a la fuerza del campo magnético, el área del bucle y la tasa de cambio del flujo, e inversamente proporcional a la resistividad del material.

Según la ley de Lenz, una corriente de Foucault crea un campo magnético que se opone al campo que lo creó, y por tanto las corrientes parásitas reaccionan sobre la

fuerza del campo magnético. La corriente que fluye a través de la resistencia del conductor también disipa la energía como calor en el material. Por lo tanto, las corrientes parásitas son una causa de pérdida de energía en inductores de CA, transformadores, motores eléctricos y generadores, entre otras máquinas de CA. Debido a esto, también son usadas para calentar objetos en hornos y equipos de calentamiento por inducción, y para detectar grietas y defectos en partes metálicas usando instrumentos de prueba especializados.

En conductores de resistividad distinta de cero generan calor, así como fuerzas electromagnéticas. El calor se puede utilizar para el calentamiento por inducción. Las fuerzas electromagnéticas para la levitación, la creación de movimiento, o para efectos de frenado. Las corrientes de Foucault también pueden tener efectos indeseables, por ejemplo, pérdida de potencia en transformadores. Bajo ciertas suposiciones (material uniforme, campo magnético uniforme, etc.), la potencia perdida debido a corrientes parásitas por unidad de masa para una lámina delgada o alambre puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D}, \text{ donde:}$$

P = Pérdida de potencia por unidad de masa (W/Kg),

B_p = Pico del campo magnético (T),

d = Espesor de la laminilla o el diámetro del cable (m),

f = Frecuencia (Hz),

k = Constante igual a 1 para una laminilla, o 2 para un cable,

ρ = Resistividad del material (Ωm),

D = Densidad del material (Kg/m^3).

Como se mencionó anteriormente, las corrientes de Foucault tienen diversas aplicaciones que van desde el calentamiento por inducción, dispositivos de frenado, efectos de repulsión de tipo diamagnético (propiedad de todos los materiales de oponerse al campo magnético aplicado), levitación magnética en superconductores ya que las corrientes de Foucault superficiales cancelan exactamente el campo dentro del conductor, por lo que ningún campo magnético penetra. Puesto que no se pierde energía en resistencia, las corrientes parásitas creadas cuando un imán es llevado cerca del conductor persisten incluso después de que el imán está parado, y pueden equilibrar exactamente la fuerza de la gravedad. También es aplicado a la identificación de metales, para pruebas no destructivas y el monitoreo de condiciones de una gran variedad de estructuras metálicas, incluyendo tubos de intercambiadores de calor, fuselaje de aeronaves y componentes estructurales de aeronaves.

Se utilizan en ciertos tipos de sensores de proximidad para observar la vibración y la posición de los ejes giratorios dentro de sus cojinetes. Esta tecnología fue originalmente pionera en la década de 1930 por los investigadores de General Electric utilizando circuitos de tubo de vacío. A finales de la década de 1950, las versiones de estado sólido fueron desarrolladas por Bently Nevada Corporation. Estos sensores son extremadamente sensibles a los desplazamientos muy pequeños lo que los hace muy adecuados para observar las vibraciones en turbomáquinas modernas.

CAPITULO II. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA

A fin de lograr la correcta y exitosa ejecución de los objetivos definidos con anterioridad en el diseño de un sistema de microposicionamiento, el trabajo se dividió en dos partes: el sistema de sensado y el mecanismo de accionamiento, a su vez el sistema de sensado se subdividió en dos partes, un circuito resonador y el convertidor inductivo digital; por su parte, el mecanismo de accionamiento consta de un motor a pasos, la electrónica necesaria para su control y un tornillo micrométrico. Finalmente, la integración de las partes anteriormente descritas constituye el sistema de posicionamiento. A continuación, se definen cada una de estas fases y las actividades que se llevaron a cabo para la conclusión de la metodología propuesta.

2.1 Diseño y Fabricación de la PCB para la Etapa de Detección

Dentro de esta primera fase, se realizó un estudio acerca de los requerimientos necesarios para el diseño y fabricación de la placa de circuito impreso correspondiente al convertidor. De igual manera, las características deseadas para el funcionamiento con bobinas de inducción electromagnética (la cual forma parte del circuito resonador), que en este caso es una bobina plana de circuito impreso. En la siguiente figura se muestra el diagrama a bloques de la etapa mencionada.

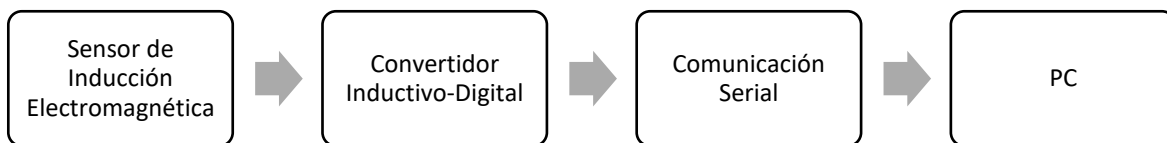


Figura 13. Diagrama a bloques de la Etapa de Detección.

De acuerdo al fabricante se siguieron las siguientes recomendaciones, tanto de diseño como en programación de ciertos registros:

2.1.1 Calculo de Rp_MIN y RP_MAX para los registros

Para la aplicación que se requirió, la cual es de sensado axial, se ocupó el módulo de evaluación para medir el rango de impedancia de resonancia parelela (Rp) en la cual se detecta el pistón del tornillo micrométrico. Una vez detectado este valor, se procede a optimizar la resolución del sensor con las siguientes recomendaciones: Para Rp_MAX, se ajustó la distancia entre el sensor y el pistón a la máxima distancia de sensado, seguido de esto verificamos el valor de Rp y lo multiplicamos por 2, para el valor del registro ocupamos el siguiente más alto que hayamos obtenido de la multiplicación. El procedimiento para Rp_MIN es similar, únicamente ajustamos la distancia a la mínima de sensado y en vez de multiplicar al Rp se va a dividir, para el registro se ocupa la siguiente más baja al resultado de acuerdo a la hoja de datos.

De forma que:

- $Rp_MAX = 9.85091 \text{ K}\Omega * 2 = 19.70182 \text{ K}\Omega$; para el registro es 21.547 K Ω
- $Rp_MIN = 6.15687 \text{ K}\Omega / 2 = 3.078435 \text{ K}\Omega$; para el registro es 2.394 K Ω

2.1.2 Capacitor de Filtro (Pines CFA y CFB)

De acuerdo a las recomendaciones, se ocupa un capacitor cerámico C0G de grado dieléctrico. Dentro del diseño de la PCB del convertidor, los trazos de los pines para CFA y CFB son lo más corto posible para minimizar las corrientes parásitas. Debido a que se considera una bobina de circuito impreso, un capacitor de 20pF es aplicado.

2.1.3 Requerimientos de diseño para el convertidor inductivo-digital

En la tabla 4 se enlistan algunos de los parámetros básicos para el diseño del convertidor, dentro de la misma se menciona la velocidad de datos de salida la cual es de 78 KSPS (Kilosamples per second) que es la velocidad máxima posible con el convertidor utilizado.

Parámetro de diseño	Valor
Mínima distancia de sensado	1 mm
Máxima distancia de sensado	10 mm
Velocidad de datos de salida	78 KSPS
Número de capas de la PCB	2

Tabla 4. Parámetros básicos de diseño para el convertidor.

Se consideran dos diseños de diagrama eléctrico, uno general y el otro tipo Shield para su aplicación con la plataforma de desarrollo Arduino. En el general se partió del circuito eléctrico proporcionado por el fabricante, del cual hay dos variantes que contemplan un reloj externo o un cristal para el contador de frecuencia. En las siguientes figuras se observan los diseños de ambas placas de circuito impreso y la fabricada para esta variante.

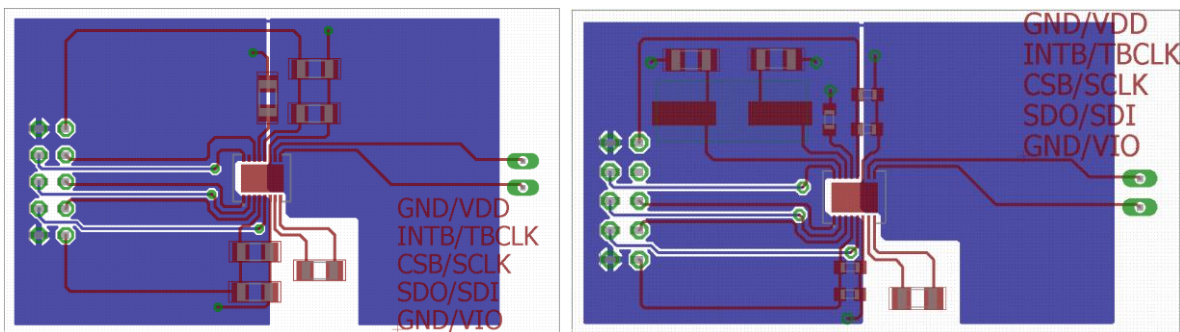


Figura 14. Diseño de PCB del convertidor.

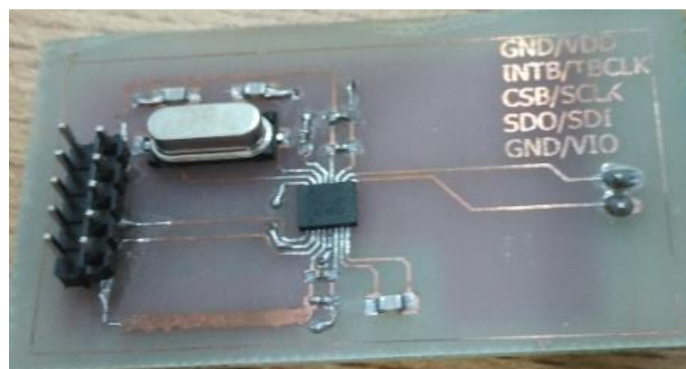


Figura 15. Primera variante de la PCB del convertidor.

Los diseños anteriormente ejemplificados fueron preliminares y sirvieron como experiencia para el tipo Shield de Arduino, el diagrama eléctrico y diseño de la PCB se muestran en las siguientes figuras; se realizó un proceso estándar para la fabricación de la placa fenólica y un proceso de fotograbado para el soldado de los componentes de montaje superficial (SMD), el cual consta de elaborar un esténcil con las zonas de deposición de la soldadura para un posterior calentamiento de los elementos por medio de un horno de reflujo. Cabe mencionar que este proceso es necesario debido a las dimensiones de los dispositivos, especialmente del convertidor.

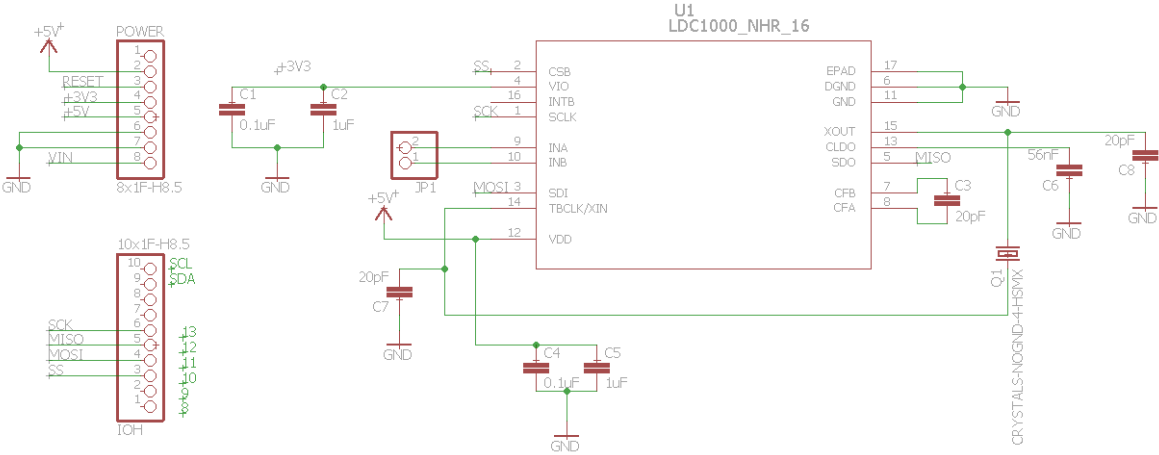


Figura 16. Diagrama eléctrico del convertidor.

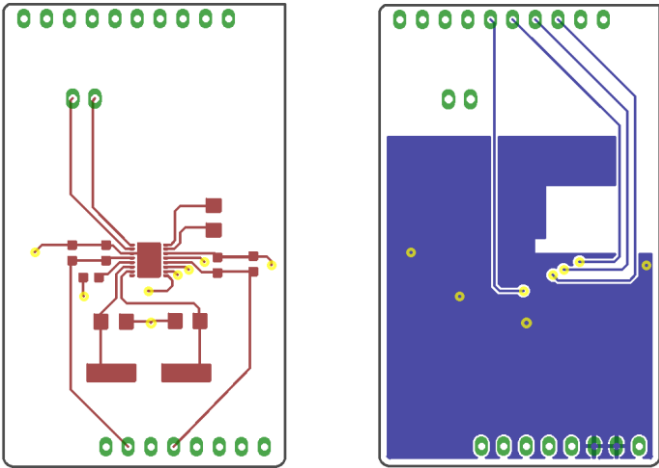


Figura 17. Diseño de la PCB tipo Shield del convertidor.

2.1.4 Requerimientos de diseño para el circuito resonador.

Uno de los elementos necesarios para el funcionamiento del convertidor es el circuito resonador, por lo que se diseñó y fabricó una bobina plana de circuito impreso, se visualiza en la figura 18. Por medio de la herramienta WEBENCH Coil Designer, se diseñó la bobina de acuerdo a las especificaciones establecidas en la hoja de datos, en la tabla 5 se enlistan las características del sensor.

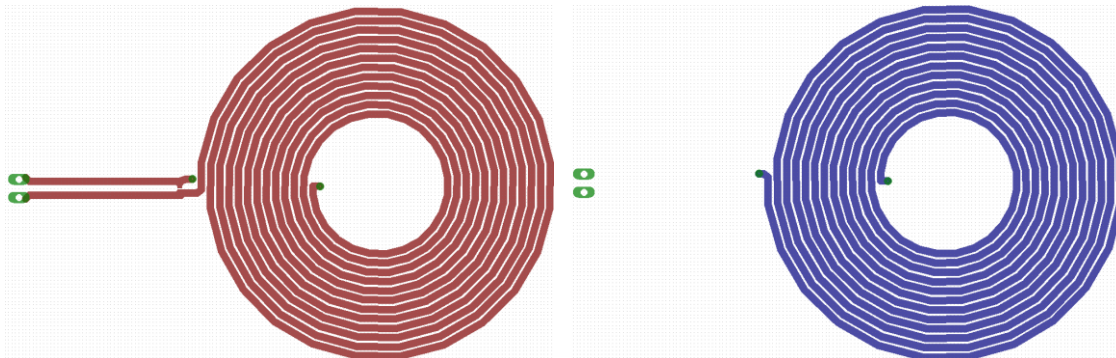


Figura 18. Diseño del circuito resonador.

Parámetro	Valor
Capas de la PCB	2
Espesor del cobre	0.0347 mm
Forma de la bobina	Circular
Número de vueltas	12
Grosor del trazado	1.016 mm
Espaciado entre trazados	0.305 mm
R_p @ 1 mm	6.34784 K Ω
R_p @ 8 mm	10.73998 K Ω
Inductancia nominal	19 μ H

Tabla 5. Características del sensor.

Se siguió el proceso estándar para la fabricación de esta placa e igualmente para el soldado del elemento capacitor, conformando así el circuito resonador que se ilustra en la siguiente imagen.

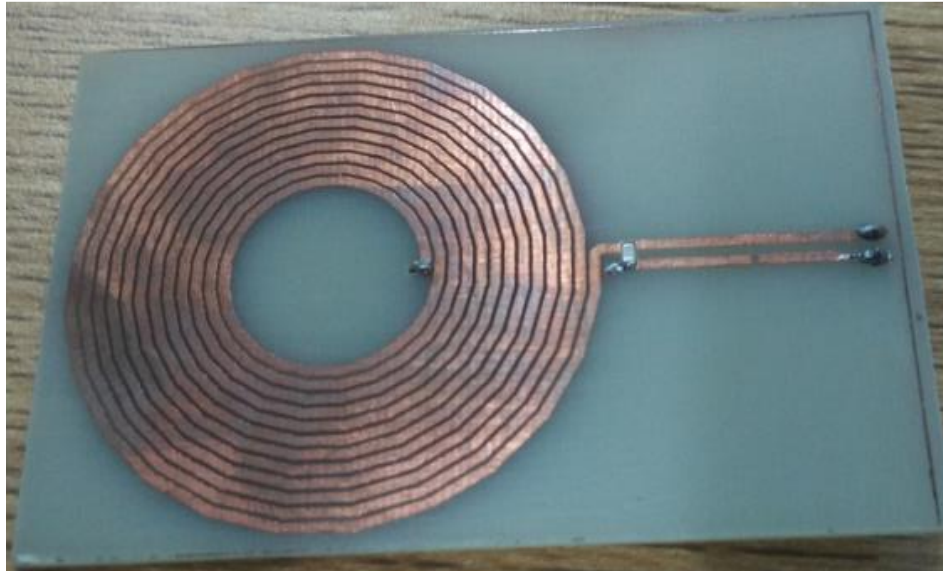


Figura 19. PCB del circuito resonador.

2.2 Diseño y Fabricación del Mecanismo de Accionamiento

Esta fue la última fase que compete al diseño de los componentes del sistema de microposicionamiento antes de su convergencia. Todo sistema de esta índole cuenta con un elemento de accionamiento, el cual es el encargado de brindar el desplazamiento de acuerdo a los datos obtenidos por el sensor de posición. Para desarrollar este mecanismo fue necesario un estudio acerca de los tornillos micrométricos y así conocer cuál se ajustaría a las necesidades del sistema, por lo que se adquirió un tornillo micrométrico de 25 mm de recorrido con una graduación de 0.01 mm; de igual manera fue necesario un estudio acerca de los dispositivos electromecánicos para su aplicación en el desplazamiento del tornillo.

Se realizaron dos prototipos del mecanismo, a continuación, se detalla el proceso que se llevó a cabo durante el diseño para su posterior fabricación. Y de la misma manera, el proceso para el control del dispositivo electromecánico. Cabe mencionar que las piezas del mecanismo que se diseñaron fue por medio del software CAD SolidWorks, por consiguiente, se trasladaron a BobCAD-CAM para obtener el código G de cada pieza y así fueron fabricadas en una Mini-Fresa CNC. En la siguiente figura se ilustra el diagrama a bloques de esta etapa.

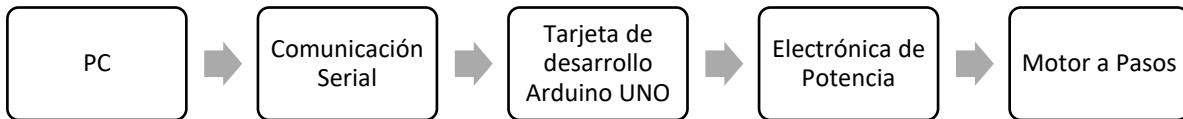


Figura 20. Diagrama a bloques del Mecanismo de Accionamiento.

2.2.1 Primer Prototipo del Mecanismo

Se diseñó y fabricó el primer prototipo del mecanismo que consta de los elementos que serán descritos e ilustrados más adelante:

- Una base para el mecanismo de accionamiento.
- Un soporte de apoyo para la sujeción de la cabeza del tornillo.
- Una base que transporta al motor.
- Un cople para la sujeción del mango del tornillo con el eje del motor.

La base para el mecanismo completo cuenta con unas hendiduras que sirven como rieles para que el motor se pueda desplazar mediante su propia base (Figura 21).

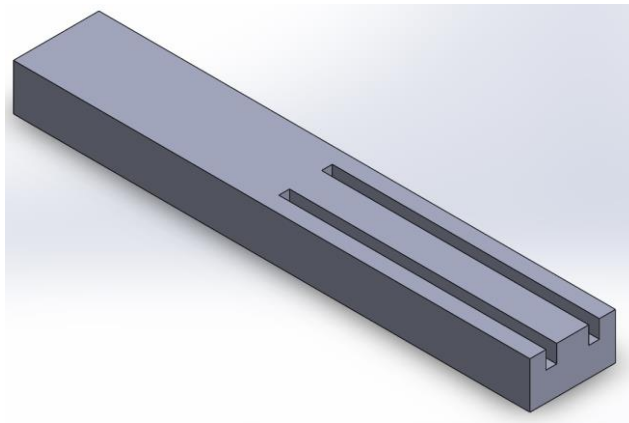


Figura 21. Base para el mecanismo de accionamiento.

El soporte de apoyo donde descansa el cabezal del tornillo micrométrico, en el cual se fijó el tornillo en sí mismo para que su pistón sea desplazado y detectar la posición de este (Figura 22).

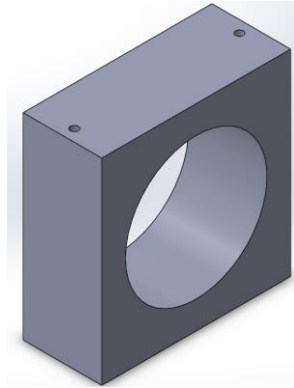


Figura 22. Soporte de apoyo para el cabezal del tornillo micrométrico.

Un cople que ajusta el mango del tornillo micrométrico con el eje del motor para correlacionar el desplazamiento que brinda el motor (Figura 23).

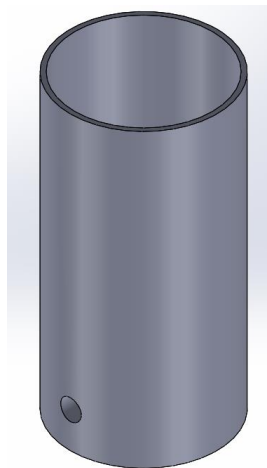


Figura 23. Cople de sujeción tornillo-motor.

La base que transporta al motor, que está diseñada para que se acople a los rieles de la base del mecanismo y ayude a su desplazamiento (Figura 24).

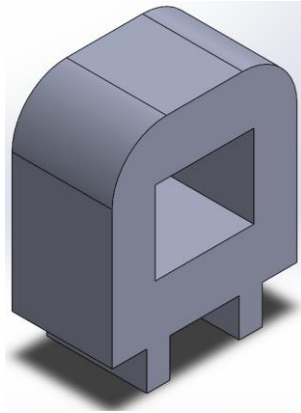


Figura 24. Base del motor.

El ensamble del mecanismo de accionamiento se visualiza en la siguiente figura, sin considerar al tornillo micrométrico y el motor. Se fabricó el mecanismo y se montaron los elementos faltantes. Al realizar las pruebas para el desplazamiento del motor se comprobó el correcto funcionamiento de las vías y rieles respectivos de cada base, aunque se notó una vibración provocando que el desplazamiento no fuera de manera coordinada.

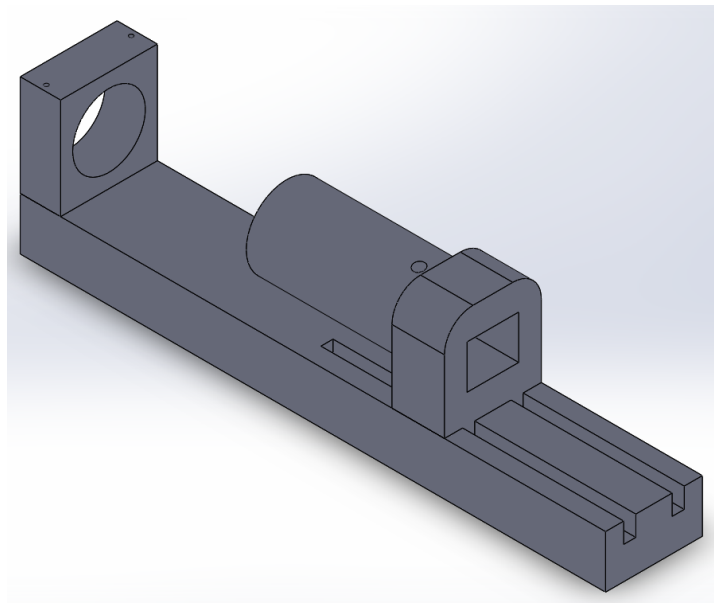


Figura 25. Diseño del Mecanismo de accionamiento.

2.2.2 Prototipo Final del Mecanismo del Sistema de Microposicionamiento

Debido a la descoordinación en el desplazamiento del motor, se procedió a modificar el diseño preliminar del mecanismo de accionamiento cambiando el medio por el cual se desplaza y, a su vez, agregando un soporte para el modulo del convertidor. A continuación, serán descritas e ilustradas las piezas para el prototipo final:

- Una base que conforma a todo el Sistema de Microposicionamiento.
- Un soporte para el desplazamiento del motor.
- Un soporte de apoyo para las varillas de ajuste.
- Un soporte de apoyo para el cabezal del tornillo.
- Un soporte para el modulo del convertidor.

Ahora la base soporta al mecanismo de accionamiento y se previó un espacio para el ensamble del soporte que contiene al módulo del convertidor (Figura 26).

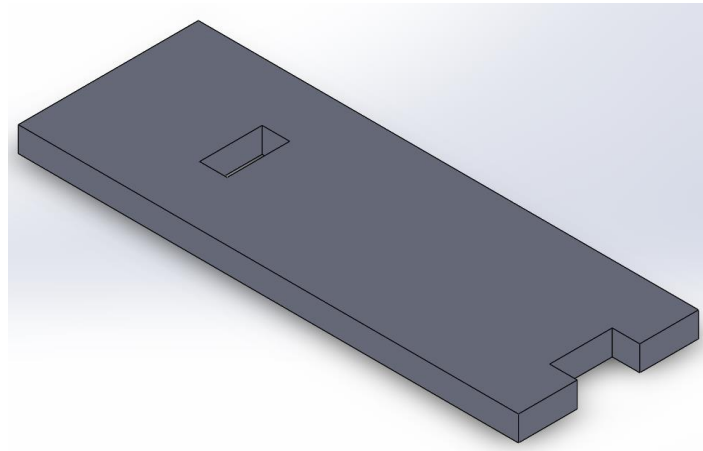


Figura 26. Base del Sistema de Microposicionamiento.

Para contrarrestar el movimiento descoordinado del motor se cambió la disposición en como este se desplaza, optando por unas varillas que sirven como guía. El soporte va atornillado a la cara frontal del motor, además, cuenta con unas orejas que soportan a las varillas por medio de unos bujes (Figura 27).

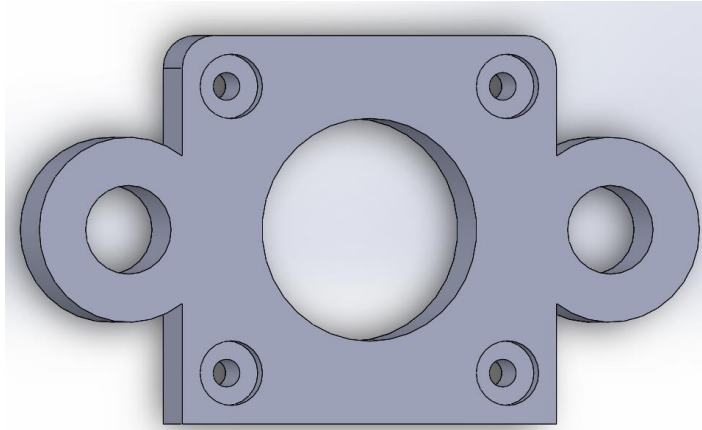


Figura 27. Soporte frontal del motor con orejas para las varillas de ajuste.

Las varillas por donde se desplaza el motor están apoyadas sobre dos soportes. El primero de estos, de igual manera, contiene el cabezal del tornillo para el correcto desplazamiento del pistón (Figura 28). Y el soporte posterior, que únicamente sirve de apoyo a las varillas (Figura 29).

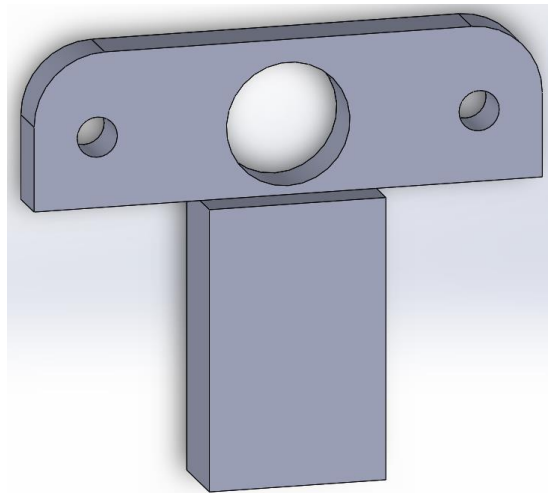


Figura 28. Soporte de apoyo para el cabezal del tornillo micrométrico y las varillas de ajuste.

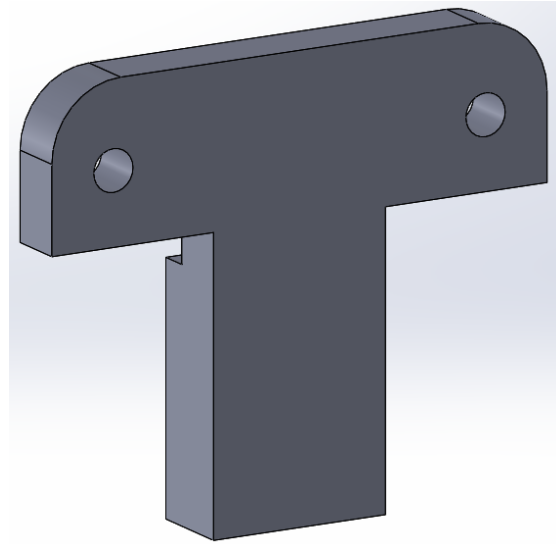


Figura 29. Soporte posterior de apoyo para las varillas de ajuste.

Como se mencionó anteriormente, un soporte para el modulo del convertidor que será ensamblado a la base del sistema. El modulo está conformado por el convertidor inductivo-digital y un circuito resonador; dentro del diseño se consideró la disposición de forma que el pistón del tornillo micrométrico queda alienado con la bobina de circuito impreso perteneciente al circuito LC (Figura 30).

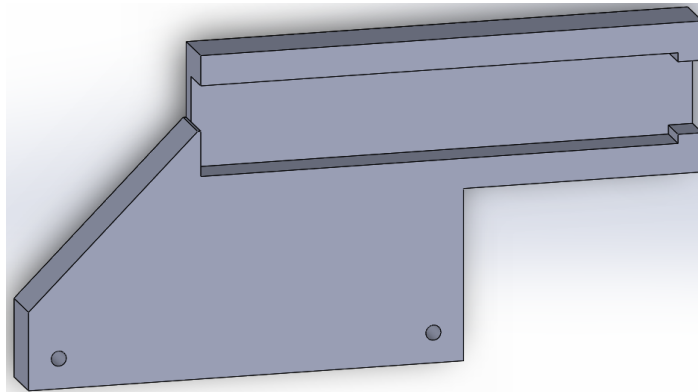


Figura 30. Soporte de apoyo para el modulo del convertidor inductivo-digital.

Una vez ensamblado el Mecanismo del Sistema de Microposicionamiento quedo tal cual se observa en la figura 34. Seguidamente, se montó el tornillo micrométrico, el motor paso a paso y el modulo del convertidor. El desplazamiento del motor junto

con el tornillo se realiza de manera más coordinada en comparación con el primer prototipo fabricado.

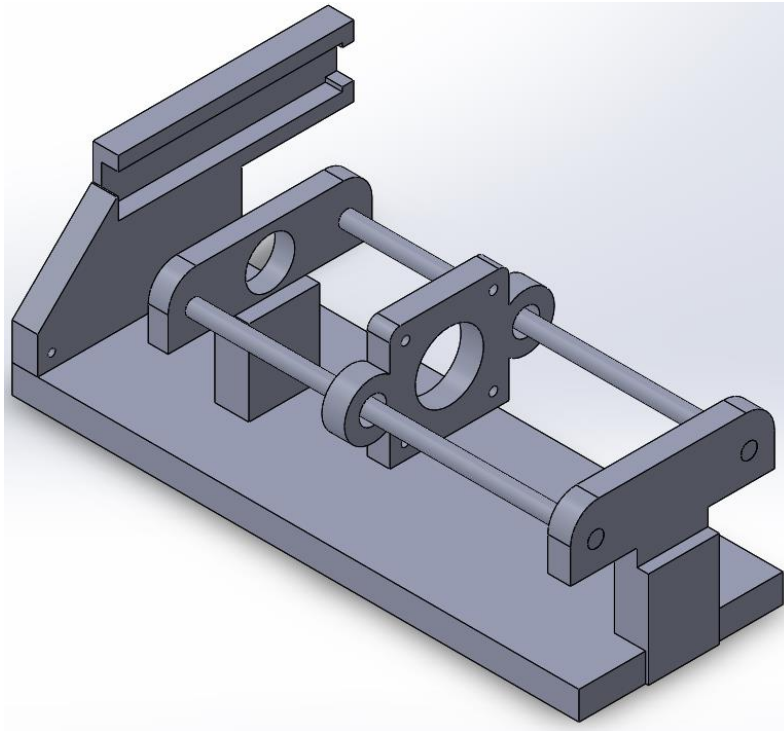


Figura 31. Diseño del Mecanismo del Sistema de Microposicionamiento.

2.2.3 Control del Dispositivo Electromecánico

Posterior al estudio de los dispositivos electromecánicos se optó por los motores paso a paso debido a la precisión que se necesita en los desplazamientos. Un motor a pasos bipolar con un paso de 1.8° , es decir, 200 pasos para una revolución es aplicado. El controlador que se ocupa es un A4988 en conjunción con una tarjeta de desarrollo Arduino UNO, se ejemplifica el diagrama de conexión en la siguiente imagen.

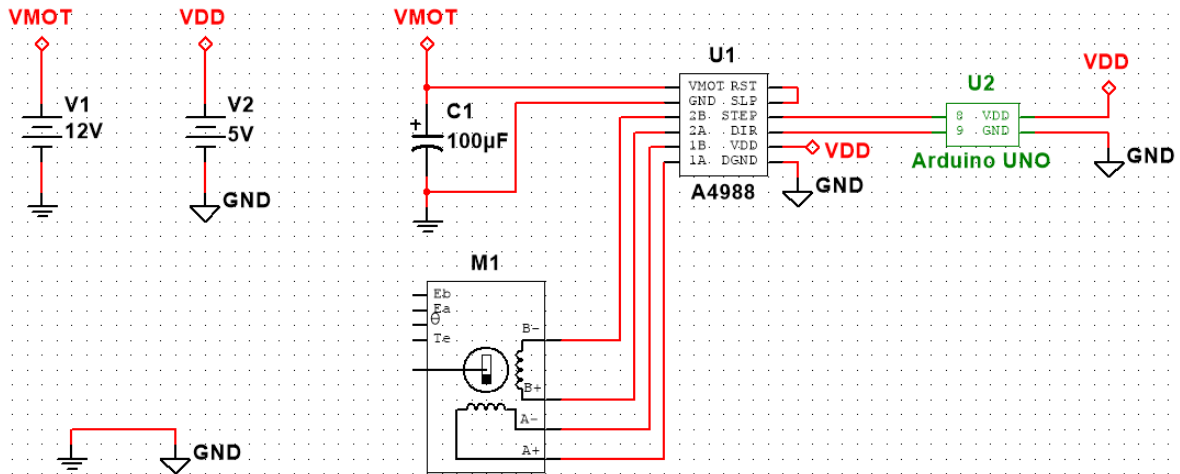


Figura 32. Diagrama eléctrico del controlador para el motor paso a paso.

2.3 Integración del Sistema de Microposicionamiento

Con la etapa de detección y el mecanismo de accionamiento acoplados, además de la implementación del controlador para el motor paso a paso quedo terminada la integración del Sistema de Microposicionamiento, Figura 33. De esta manera se realizaron una serie de mediciones que fueron analizadas para la validación del sistema, en el siguiente capítulo se profundizará en las mismas.

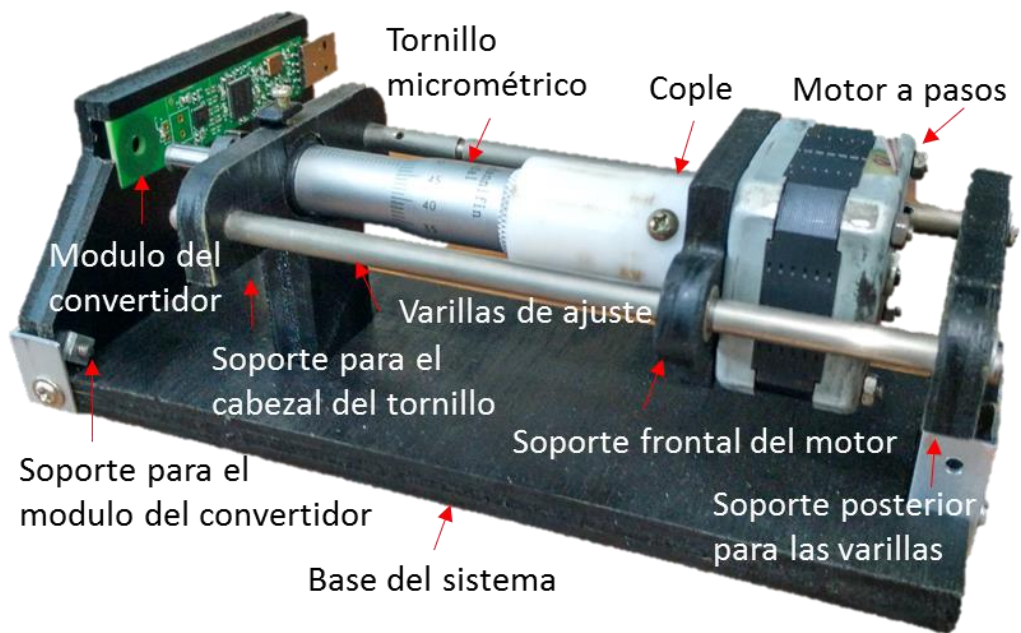
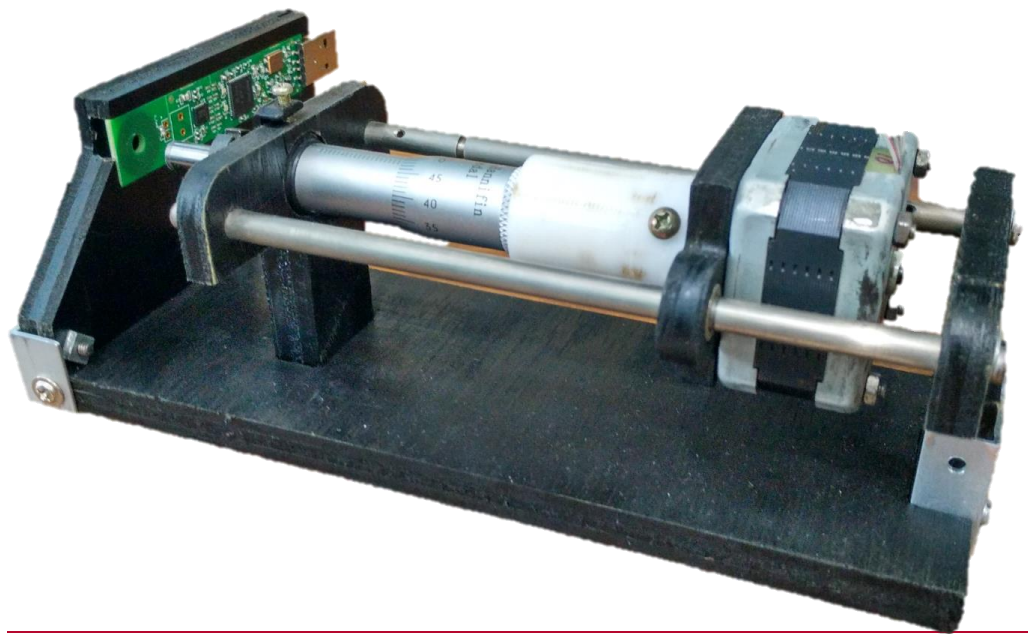


Figura 33. Sistema de Microposicionamiento.

CAPITULO III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se abordará el conjunto la serie de pruebas que se realizó de primera instancia, de acuerdo al arreglo de los elementos del sistema con el fin de comprender el funcionamiento y el alcance del sistema. Con base en ellas, se analizaron los resultados conseguidos para conocer de manera general el comportamiento del sistema por medio de sus estadísticas. Se realizó el ajuste a la curva de respuesta para la obtención de la función modelo matemática ae y por último se ejecutó una serie de pruebas adicionales para la validación de los resultados previamente obtenidos.

Hay dos tipos de errores en las mediciones: errores sistemáticos y aleatorios. En el caso de los errores aleatorios, donde el error es causado por efectos impredecibles, solo es posible cuantificarlo en términos probabilísticos. Para conocer el valor aproximado de un error aleatorio en una medición se puede calcular como un valor medio o mediano. Y para conocer la extensión de la medida sobre el valor medio se puede cuantificar como la desviación estándar. Por esto es importante realizar análisis estadísticos a las mediciones.

Se puede expresar al valor promedio de un conjunto de mediciones de cantidad constante como el valor medio o la mediana. Mientras el número de mediciones incrementa, la diferencia entre la media y la mediana se vuelve pequeña. Sin embargo, el promedio calculado en términos del valor medio siempre es ligeramente cercano al valor correcto de la medida para cualquier conjunto finito de mediciones; en comparación al de la mediana[15].

3.1 Pruebas preliminares

El sistema de microposicionamiento está dispuesto de tal forma que el eje del motor a pasos se encuentra perpendicular al circuito resonador del convertidor, y así este puede detectar la posición axial del eje cuando se aproxima o se aleja del resonador. Obteniendo como salida el valor de la impedancia de resonancia paralela del circuito resonador expresada en $K\Omega$'s.

A una distancia de 1 mm se posiciono el eje del motor respecto al resonador, a partir de ahí se desplazó 1 mm en cada paso hasta conseguir 10 mm de distancia entre ellos. En cada desplazamiento milimétrico se adquirió un conjunto de lecturas (200 por muestra), de las cuales se muestra un extracto de ellas en la Tabla 6.

Distancia entre el convertidor y el eje del motor										
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
Impedancia Paralela ($K\Omega$)	6.344	8.0165	9.360	10.02	10.388	10.583	10.675	10.741	10.769	10.811
	6.340	8.017	9.262	10.015	10.391	10.580	10.676	10.739	10.764	10.812
	6.353	8.024	9.178	10.040	10.390	10.573	10.676	10.741	10.773	10.811
	6.337	8.004	9.195	10.033	10.386	10.583	10.666	10.744	10.771	10.812
	6.337	8.014	9.233	10.036	10.390	10.582	10.662	10.741	10.767	10.806
	6.339	8.015	9.306	9.997	10.386	10.575	10.667	10.748	10.767	10.804
	6.361	8.017	9.182	9.928	10.385	10.573	10.669	10.752	10.767	10.807
	6.356	8.02	9.22	10.031	10.384	10.576	10.665	10.746	10.775	10.808
	6.353	8.025	9.336	10.009	10.384	10.573	10.666	10.745	10.770	10.802
	6.340	8.014	9.348	9.984	10.380	10.576	10.666	10.741	10.770	10.798

Tabla 6. Extracto de las lecturas del convertidor inductivo-digital.

Se realizó un análisis estadístico al conjunto de lecturas recabadas para determinar el comportamiento del sistema. Con base en el análisis, se observa una desviación estándar de entre el 0.5% y el 6% en su punto más crítico para un conjunto específico de datos.

Distancia	Promedio	Desv. Est.	Sumatoria	Mínimo	Mediana	Máximo
1 mm	6.34784	0.00787	1269.56726	6.3373	6.34642	6.36381
2 mm	8.02208	0.01213	1604.41509	7.99616	8.02087	8.07592
3 mm	9.30838	0.06586	1861.67643	9.05911	9.31292	9.42783
4 mm	10.00671	0.03177	2001.34207	9.8685	10.0118	10.05515
5 mm	10.38005	0.00723	2076.01054	10.3536	10.3804	10.39384

6 mm	10.57191	0.00536	2114.38173	10.55924	10.57189	10.58965
7 mm	10.67338	0.00591	2134.67689	10.65743	10.6729	10.68841
8 mm	10.73998	0.00548	2147.99589	10.72739	10.73913	10.75353
9 mm	10.77648	0.00598	2155.29559	10.76402	10.77585	10.7943
10 mm	10.80773	0.00586	2161.54583	10.79298	10.80752	10.81812

Tabla 7. Análisis estadístico de las lecturas del convertidor.

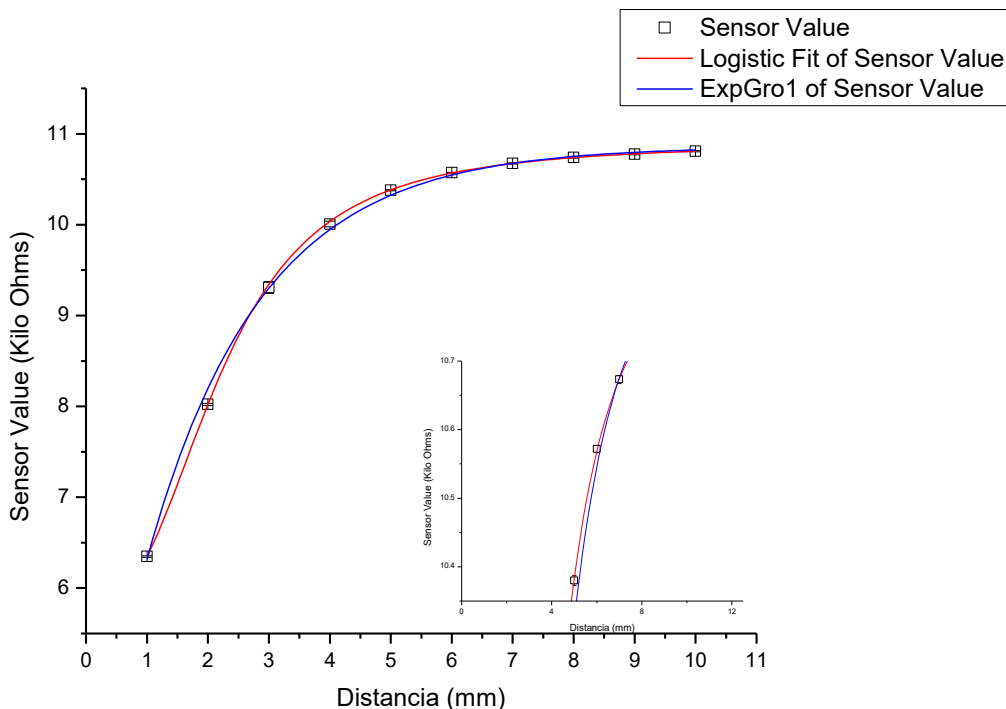


Figura 34. Gráfica de la relación distancia – resistencia, con ajuste a funciones logística y exponencial creciente.

Con los datos del análisis estadístico aplicado se determinó la relación que existe entre la distancia del eje del motor respecto al circuito resonador, como la impedancia de resonancia paralela aumenta en un rango de 1 mm - 10 mm de distancia (Figura 34). De la misma manera, establecido el comportamiento del sistema se realizaron ajustes a funciones de respuesta del tipo logística y exponencial creciente de un coeficiente para obtener la funciónel—modele matemáticae.

Todos los ajustes aplicados son a curvas no lineales, para obtener los valores óptimos de los parámetros se emplea un procedimiento iterativo que minimiza el valor del error de escala con cuadrado (reduced chi-square). Este valor es obtenido dividiendo la suma residual de cuadrados (RSS), que en realidad es la suma del cuadrado de las desviaciones verticales de cada punto de datos a la línea de regresión de ajuste calculado mediante el método de mínimos cuadrados, por los grados de libertad de error (DOF). Típicamente, esta cantidad no suele ser una buena medida para determinar el mejor ajuste. Otra medida sería el valor r-square, también conocido como el coeficiente de determinación (COD). Mientras más cercano se encuentre este valor a 1, más cercano es el ajuste a los datos analizados. Pero no necesariamente un valor mayor del r-square significa un mejor ajuste porque los grados de libertad de error también afectan al valor. El adjusted r-square es una versión modificada del coeficiente de determinación que se ajusta para el número de predictores (x) en la línea de ajuste, siendo este una mejor medida para determinar el ajuste.

Tomando los parámetros de los ajustes se realizó un análisis matemático, haciendo énfasis en la comparación del estado de ajuste, el valor del error de escala con cuadrado, el valor RSS, el valor de ajuste del coeficiente de determinación y los errores porcentuales por parámetro.

Para el caso de la función exponencial de un coeficiente el estado de ajuste fue exitoso después de 6 iteraciones satisfaciendo los criterios de tolerancia, el valor del error de escala con cuadrado de 47.86674, el valor RSS de 335.06718, el valor del ajuste del coeficiente de determinación de 0.99863 y se observa un valor máximo de incertidumbre aproximadamente del 4.2%.

Equation	$y = A1*exp(x/t1) + y0$	Fit Status	Succeeded
Reduced Chi-sqr	47.86674		
RSS	335.06718		
Adj. R-Square	0.99863		
	<i>Value</i>	<i>Standard Error</i>	<i>Porcentual Error</i>

Sensor Value	y0	10.85894	0.02938	0.270560478
Sensor Value	A1	-7.75458	0.18644	-2.404256581
Sensor Value	t1	-1.87031	0.07845	-4.194491822

Tabla 8. Parámetros del ajuste a una función exponencial creciente de un coeficiente.

En el caso de la función de respuesta logística, el estado de ajuste después de 5 iteraciones fue exitoso, el valor del error de escala con cuadrado de 0.37329 que es más cercano a la unidad indicando un buen resultado de ajuste e implicando que la diferencia entre los datos observados y los datos ajustados son consistentes con la varianza del error, el valor RSS de 2.23975 que es menor infiriendo que **la función modelo** se ajusta mejor a los datos, el valor del ajuste del coeficiente de determinación de 0.99999 cercano a la unidad que es el valor ideal en comparación con la función exponencial de un coeficiente. Además, el valor de los errores porcentuales es menor siendo 0.68% el mayor de estos.

Equation	$y = A2 + (A1-A2)/(1 + (x/x0)^p)$		Fit Status	Succeeded
Reduced Chi-sqr	0.37329			
RSS	2.23975			
Adj. R-Square	0.99999			
		Value	Standard Error	Porcentual Error
Sensor Value	A1	5.79547	0.01446	0.249505217
Sensor Value	A2	10.89606	4.21E-03	0.03863782
Sensor Value	x0	2.20189	0.00778	0.353332819
Sensor Value	p	2.67046	1.82E-02	0.68190499

Tabla 9. Parámetros del ajuste a una función de respuesta logística.

Debido al análisis anterior, se consideró optar por el ajuste logístico, resultando en **la función modelo** matemática de la ecuación 1 con sus parámetros en la Tabla 10. La variable dependiente del sistema es la impedancia **de resonancia** paralela, ésta cambia con respecto a la distancia (variable independiente) a la que se encuentre el eje del motor con el convertidor inductivo-digital.

$$y = A2 + \frac{(A1-A2)}{\left(1 + \left(\frac{x}{x0}\right)^p\right)} \quad \text{Ecuación [1]}$$

$$y = \text{Impedancia de resonancia paralela (K}\Omega\text{)}$$

x = Distancia (mm)

A1 = 5.79547

A2 = 10.89606

x0 = 2.20189

p = 2.67046

Tabla 10. Parámetros de la función-modelo matemática para el sistema.

Como se mencionó anteriormente, los ajustes se hicieron con base a funciones de respuesta logística y exponencial creciente de un coeficiente, siendo estas las que más se acercan a la curva de respuesta del sensor. A modo de comparación de las funciones propuestas se realizaron dos ajustes adicionales: Ajuste polinomial y función de Boltzmann (Figura 35).

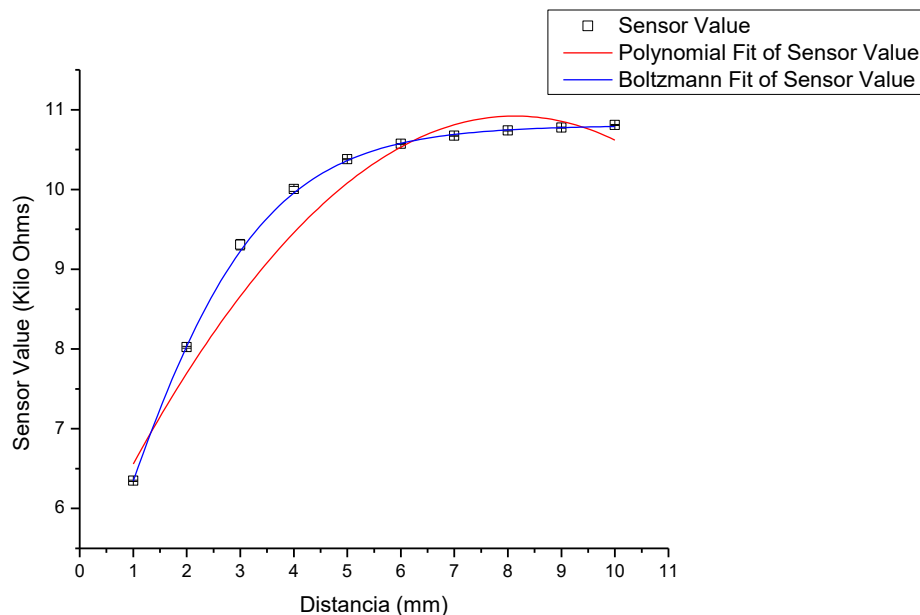


Figura 35. Gráfica de la relación distancia – resistencia, con ajuste polinomial y función de Boltzmann.

La función-modelo polinomial obtuvo un valor del ajuste del coeficiente de determinación de 0.97367 con un error porcentual máximo de 0.24%. Para la función de Boltzmann el estado de ajuste fue exitoso después de 8 iteraciones, el

valor del ajuste del coeficiente de determinación crece hasta 0.99985 y un valor de incertidumbre de 163%.

3.2 Validación de los Resultados

Para la comprobación de los resultados obtenidos durante las pruebas preliminares se procedió a despejar la variable independiente del sistema para hacer una validación con distintos valores de impedancia de resonancia paralela, corroborando la distancia a la que se encuentran los objetivos (Ecuación 2).

$$x = x_0 \left(\frac{y - A_1}{A_2 - y} \right)^{\frac{1}{p}} \quad \text{Ecuación [2]}$$

3.3 Rango de alcance

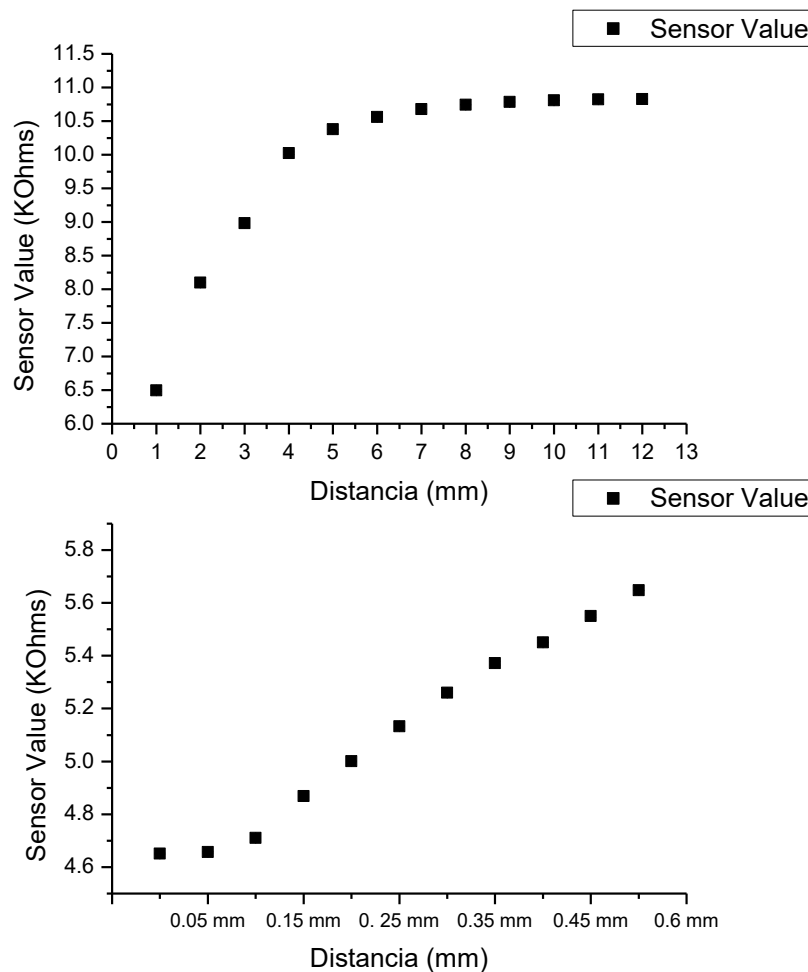


Figura 36. Gráfica del rango superior e inferior del convertidor inductivo-digital.

Como se observa en la gráfica de la Figura 36, se estableció el rango de alcance para los niveles inferior y superior del convertidor. Se determinó la mínima y máxima distancia a la cual el sensor del convertidor puede detectar cambios en la posición de los objetivos de metal contrapuestos con él. De acuerdo con los datos de la Tabla 11 correspondientes al rango de alcance, la variación que existe en la impedancia de resonancia paralela entre 0 mm y 50 μm es de milésimas por lo que se considera despreciable. Se observa un cambio notable a los 100 μm , valorando a esa distancia como la mínima detectable por el sensor respecto al objetivo. En el rango superior,

a partir de los 11 mm los valores de las mediciones empiezan a ser repetibles o con variaciones mínimas a juzgar.

Distancia (mm)	Sensor Value (K Ω)	Desv. Est.	Error Porcentual
10	10.8063	0.00379	0.035072134
11	10.82138	0.00381	0.035208079
12	10.82691	0.00348	0.032142135
0	4.65138	0.00225	0.048372741
0.05	4.6566	0.00274	0.058841215
0.10	4.71022	0.00201	0.042673166

Tabla 11. Valores para los rangos de alcance del convertidor.

3.4 Resolución medible del convertidor inductivo-digital

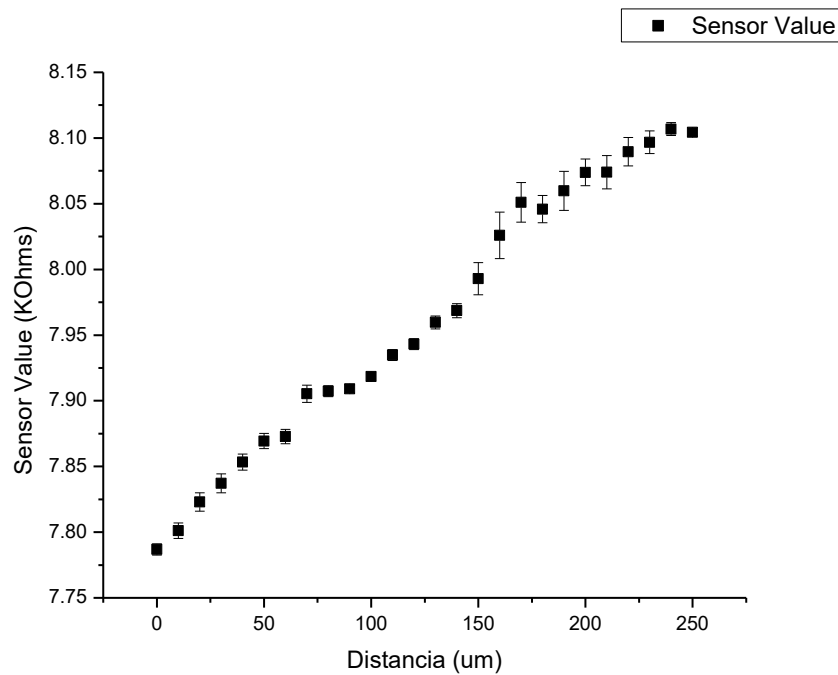


Figura 37. Desplazamientos cada 10 μm por medio del tornillo micrométrico.

Se verificó la resolución por medio de desplazamientos con el tornillo micrométrico (Figura 37), observándose variaciones en la impedancia de resonancia paralela cada 10 μm . Valorándose esta como la resolución del sistema debido a las limitantes propias del tornillo. Con un error porcentual menor al 1% de acuerdo a los datos de la Tabla 12.

Distancia (μm)	Sensor value (K Ω)	Desv. Est.	Error porcentual	Distancia (μm)	Sensor value (K Ω)	Desv. Est.	Error porcentual
0	7.787	0.004	0.055	130	7.960	0.005	0.062
10	7.801	0.006	0.076	140	7.969	0.005	0.067
20	7.823	0.007	0.090	150	7.993	0.012	0.152
30	7.837	0.007	0.092	160	8.026	0.018	0.220
40	7.853	0.006	0.078	170	8.051	0.015	0.187
50	7.869	0.006	0.074	180	8.046	0.010	0.130
60	7.873	0.005	0.069	190	8.060	0.015	0.184
70	7.905	0.007	0.082	200	8.074	0.010	0.126
80	7.907	0.004	0.052	210	8.074	0.013	0.156
90	7.909	0.003	0.034	220	8.090	0.011	0.133
100	7.918	0.003	0.039	230	8.097	0.009	0.107
110	7.935	0.004	0.053	240	8.107	0.005	0.061
120	7.943	0.004	0.053	250	8.104	0.003	0.035

Tabla 12. Valores para la resolución del convertidor.

De la manera que se indica, esta es la resolución medible del sistema debido a la limitante en la graduación del tornillo milimétrico de 10 μm . Sin considerar esta limitante, se realizaron pruebas para tener un aproximado de cuál sería la resolución que se conseguiría. Para el avance de las 10 μm es necesario efectuar 4 pasos con el motor, con 1 paso se obtuvo una resolución aproximada de 2.5 μm . Esta resolución puede ser aumentada efectuando micro-pasos con el motor, es decir, fraccionando el paso que es efectuado. Y la manera de lograr la resolución medible para esta distancia sería obteniendo un tornillo micrométrico con una graduación menor. Considerando esto como parte de los trabajos futuros para este y los demás proyectos en los que interviene.

CONCLUSIONES

Con la aplicación de una metodología especifica especifica para cada etapa del sistema presentada en el Capítulo II, se consiguió el diseño y desarrollo de un sistema de microposicionamiento a base de un convertidor inductivo-digital y un sistema mecánico para el desplazamiento de un motor acoplado a un tornillo micrométrico.

El diseño y la fabricación del sistema se dividió en las dos etapas de las que consta, que es la detección y el accionamiento. En donde, se diseñó y fabricó una PCB de prueba para comprobar el funcionamiento del convertidor correspondiente a la detección. Por otra parte, se diseñaron las piezas para el sistema mecánico por medio de un software CAD y se fabricaron haciendo uso de una Mini-Fresadora CNC y una impresora 3D. Posteriormente, el acoplamiento del tornillo micrométrico con el motor a pasos se incorporó a este sistema para conseguir el mecanismo de accionamiento.

Un conjunto de pruebas se llevó a cabo para conocer el comportamiento general del sistema, posteriormente consecutivamente se requirieron pruebas más específicas delimitadas para fijar los rangos de alcance del sensor inductivo, así como también la resolución que se alcanza con la implementación-aplicación del convertidor. Cada una de las pruebas mencionadas se sometió a análisis estadísticos y matemáticos para la obtención de los resultados.

Como conclusión, se obtuvo un sistema que alcanza resoluciones en los desplazamientos de hasta 10 μm con un rango de alcance entre 100 μm – 11 mm para la detección de los objetivos próximos al sensor inductivo, cabe mencionar que dichos valores están restringidos por las condiciones del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Springer Handbook of Robotics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] J. Juuti, M. Leinonen, and H. Jantunen, *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [3] T. W. Seo, H. S. Kim, D. S. Kang, and J. Kim, "Gain-scheduled robust control of a novel 3-DOF micro parallel positioning platform via a dual stage servo system," *Mechatronics*, vol. 18, no. 9, pp. 495–505, 2008.
- [4] Q. Xu, "Design and implementation of a novel rotary micropositioning system driven by linear voice coil motor," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 5, pp. 1–9, 2013.
- [5] M. Stage, "A Model Reference Adaptive PID Control for Electromagnetic Actuated," pp. 97–102, 2012.
- [6] S. Xiao and Y. Li, "Optimal design, fabrication, and control of an XY micropositioning stage driven by electromagnetic actuators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4613–4626, 2013.
- [7] F.-S. Hwu, K.-H. Lin, and Y.-H. Hu, "Design, analysis and fabrication of a novel six-axis micropositioning stage," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 69–75, 2013.
- [8] Y. Yun and Y. Li, "Modeling and Control Analysis of a 3-PUPU Dual Compliant Parallel Manipulator for Micro Positioning and Active Vibration Isolation," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 134, no. 2, p. 21001, 2012.
- [9] M. Al Janaideh, C. Y. Su, and S. Rakheja, "Compensation of rate-dependent hysteresis nonlinearities in a piezo micro-positioning stage," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 512–517, 2010.
- [10] Q. Xu and M. Jia, "Model reference adaptive control with perturbation estimation for a micropositioning system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 352–359, 2014.
- [11] Q. Xu, "Digital Sliding-Mode Control of Piezoelectric Micropositioning System Based on Input – Output Model," vol. 61, no. 10, pp. 5517–5526, 2014.
- [12] K. Uchino and G. Jayne, *MicroMechatronics*. CRC Press, 2003.
- [13] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [14] J. A. J. B. B. Lou Wilson, *Física*. 2007.
- [15] A. S. Morris and L. Reza, *Measurement and Instrumentation*. 2015.