



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – MECATRÓNICA

SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO DE ELECTRODOS PARA
REGISTRAR ACTIVIDAD NEURONAL EN RATAS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LUIS IVÁN GARCÍA BELTRÁN, ING.

TUTOR
DR. CABALLERO RUIZ ALBERTO, CCADET, UNAM.

COMITÉ TUTOR
DR. BORJA RAMÍREZ VICENTE, FI, UNAM.
DR. RUIZ HUERTA LEOPOLDO, CCADET, UNAM.
DR. CABALLERO RUIZ ALBERTO, CCADET, UNAM.
DR. HEREDIA LÓPEZ FRANCISCO JOSÉ, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA.
DR. ROCHA CÓZATL EDMUNDO GABRIEL, FI, UNAM.

MÉXICO, D. F. ABRIL 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente : Dr. Borja Ramírez Vicente
Secretario : Dr. Ruiz Huerta Leopoldo
Vocal : Dr. Caballero Ruiz Alberto
1^{er} Suplente : Dr. Heredia López Francisco José
2^o Suplente : Dr. Rocha Cózatl Edmundo Gabriel

Lugar donde se realizó la tesis:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET. Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, GMM.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruiz y la participación del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica. Este proyecto fue sustentado por los proyectos CONACYT-LAB-2014-01-232719, CONACYT-INFR-2014-02-230519 y UNAM-PAPIME PE103214. También se agradece al grupo de ingeniería de precisión y metrología por facilitar sus instalaciones.

Agradecimientos

A mis padres Jaime y Margarita, por todo su amor y apoyo incondicional, por los valores y principios que me han transmitido. Personas quienes con su ejemplo me han enseñado que la base del éxito es la constancia y perseverancia.

A mis hermanos Alexander y Anayeli con quienes he pasado momentos inolvidables y quienes me han inspirado siempre a salir adelante tratando de dar el mejor ejemplo. Los quiero hermanos.

A Cielo Montes de Oca, quien con su cariño, amor y comprensión me ha motivado a nunca darme por vencido. Gracias por ser parte de esta etapa de mi vida.

A mi tutor y amigo, Dr. Alberto Caballero, por sus consejos, apoyo y paciencia que fueron determinantes para concluir este trabajo. También agradezco su amistad y sus enseñanzas las cuales han fomentado mi formación y superación profesional.

Al Dr. Leopoldo Ruiz, quien con su amistad, apoyo, confianza y forma de ser me ha impulsado a mejorar como profesionista.

A mis amigos y compañeros de la maestría con quienes compartí excelentes momentos y gratas experiencias: Pedro, Luis y Cristian. También a mis compañeros del laboratorio de Micromecánica: Pepe, Cesar, Homero, Yara, Marcos, Juan, Carlos y Roque, personas quienes han hecho más amena mi estancia en el laboratorio.

A mis sinodales: Dr. Vicente Borja, Dr. Edmundo G. Rocha, Dr. José F. Heredia, por sus comentarios y aportaciones que fueron determinantes para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme los recursos y la oportunidad de cumplir otro sueño lleno de conocimientos e inolvidables experiencias.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES	3
1.1 Electrofisiología de la neurona	3
1.2 Electrofisiología neuronal en animales vivos	5
1.2.1 Ventajas y desventajas de la electrofisiología neuronal en animales vivos	8
1.3 Dispositivos de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en ratas (<i>Microdrives</i>).....	8
1.3.1 <i>Microdrives</i> manuales.....	9
1.3.2 <i>Microdrives</i> automáticos	11
2 OBJETIVO Y ALCANCES	16
2.1 Planteamiento del problema.....	16
2.2 Objetivo	18
2.3 Alcances.....	18
3 MARCO TEÓRICO	19
3.1 Métodos convencionales de microposicionamiento	19
3.2 Nuevos actuadores	22
3.2.1 Motores piezoeléctricos.....	23
3.2.1.1 Motores ultrasónicos.....	23
3.2.1.2 Motores forzados	27
3.3 Técnicas de control para actuadores piezoeléctricos	27
3.4 Sensores para sistemas micro-mecatrónicos.....	29
3.4.1 Métodos de resistencia.....	29
3.4.2 Métodos de inducción electromagnética	30
3.4.3 Métodos de capacitancia.....	31
3.4.4 Métodos ópticos.....	31
4 DESARROLLO DEL SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO (<i>MICRODRIVE</i>)	33
4.1 Requerimientos y especificaciones	33

4.2	Diseño del sistema de microposicionamiento.....	34
4.2.1	Diseño del mecanismo y selección del actuador.	35
4.2.1.1	Diseño conceptual.....	38
4.2.1.1.1	Propuesta 1	39
4.2.1.1.2	Propuesta 2	40
4.2.1.1.3	Propuesta 3	42
4.2.1.1.3.1	Rediseño de la propuesta 3 y mecanismo final	44
4.2.1.1.3.1.1	Fabricación del mecanismo	45
4.2.2	Montura	48
4.2.3	Sistema de control de movimiento de <i>Microdrive</i>	50
4.2.3.1	Controlador de motor piezoeléctrico NSD-2101 (Generación de pulsos)..	53
4.2.3.2	Sistema de sensado (Detección de la señal del sensor y análisis)	56
4.2.3.2.1	Selección del sensor	57
4.2.3.2.2	Calibración del sensor	61
4.2.3.3	Comunicación con la PC.....	64
4.2.3.4	Control de posición.	65
4.2.3.5	Hardware electrónico.....	67
5	PRUEBAS Y RESULTADOS	71
5.1	Movimiento del sistema y medición de los desvíos de la trayectoria.....	71
5.2	Resolución y rango de desplazamiento.....	73
5.3	Evaluación del sistema de posicionamiento automático.....	73
5.4	Evaluación del sistema de sensado	76
5.5	Dimensiones físicas	79
	TRABAJO A FUTURO	82
	REFERENCIAS	83
	ANEXOS	85
A.1	Código de MATLAB para la aproximación polinomial de la curva del sensor	85
A.2	Diagrama de flujo del algoritmo de control para el <i>microdrive</i>	86
A.3	Código para la programación del microcontrolador	89
A.4	Diseño de tarjeta electrónica.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagramas que ilustran la separación de las cargas entre la membrana celular.....	4
Figura 2. Diagrama de un potencial de acción con sus distintas fases	5
Figura 3. Corte sagital del cerebro de la rata.....	6
Figura 4. Vista superior y lateral del cráneo de una rata de la raza Wistar con 290g de peso.....	7
Figura 5. <i>Microdrive</i> manual desarrollado en 2003 en la Universidad de Otago.....	9
Figura 6. <i>Microdrive</i> manual con elementos de cemento dental.....	10
Figura 7. <i>Microdrive</i> manual publicado en Mayo 2014	11
Figura 8. Vista general del <i>microdrive</i> hidráulico	12
Figura 9. <i>Microdrive</i> con motores DC.....	13
Figura 10. <i>Microdrive</i> basado en un motor a pasos.....	14
Figura 11. <i>Microdrive</i> basado en un motor piezoeléctrico	15
Figura 12. Diagrama esquemático de un sistema completo de registro de actividad neuronal	17
Figura 13. Diagrama de mecanismo de reducción de desplazamiento accionado por presión hidráulica o neumática.....	19
Figura 14. Ilustración de un mecanismo de desplazamiento basado en un tornillo de potencia.....	20
Figura 15. Mecanismos de reducción de posicionamiento basados en un resorte con deformación constante (a), en deformación de cuerpos rígidos (mecanismo de flexión) (b) y en cuñas (c).....	20
Figura 16. Esquema de un motor basado en una bobina de voz.....	21
Figura 17. Estructura básica de un motor ultrasónico	24
Figura 18. Motor de acoplador vibratorio.	25
Figura 19. Principio de funcionamiento del motor de onda viajera	25
Figura 20. Ejemplo de estructuras de motores rotativo y lineal.	26
Figura 21. Actuador lineal constituido por placas cerámicas piezoeléctricas y su modo de desplazamiento	27
Figura 22. Clasificación de motores piezoeléctricos basada en el voltaje de excitación.	28

Figura 23. Estructura básica de una galga extensiométrica y un potenciómetro magneto-resistivo.....	30
Figura 24. Transformador diferencial y estructura de un sensor de corrientes Eddy.....	31
Figura 25. Configuración general de un interferómetro de Michelson	32
Figura 26. Diagrama que muestra las partes del nuevo <i>microdrive</i>	34
Figura 27. Experimento de la gelatina para estimar la fuerza de penetración.....	36
Figura 28. Estructura del motor piezoeléctrico SQL-RV-1.8 SQUIGGLE.....	38
Figura 29. Diseño mecánico con el motor SQL-RV-1.8 SQUIGGLE propuesto por New Scale Technologies	39
Figura 30. Propuesta 1 de diseño conceptual del mecanismo.	39
Figura 31. Fabricación de la propuesta 1 del mecanismo.....	40
Figura 32. Segunda propuesta de diseño conceptual del mecanismo. Elementos que conforman el acoplamiento y vista isométrica del ensamble.	41
Figura 33. Segundo prototipo del mecanismo del <i>microdrive</i> y tarjeta electrónica de desarrollo MC-3300-RV de New Scale Technologies.	42
Figura 34. Vista explosiva de la tercera propuesta de diseño del mecanismo.....	43
Figura 35. (A) Componentes y (B) ensamble del prototipo del tercer diseño del mecanismo.	43
Figura 36. Vista explosiva del diseño final del acoplamiento mecánico del sistema de microposicionamiento.	44
Figura 37. Ilustración del buje del mecanismo.....	45
Figura 38. Fabricación y secuencia de ensamble mecánico del <i>microdrive</i>	48
Figura 39. Digitalización del cráneo de una rata y el diseño de la forma de la montura para el <i>microdrive</i>	49
Figura 40. Diseño de la montura para fijar el <i>microdrive</i> a la cabeza de la rata y algunas de sus dimensiones críticas.	50
Figura 41. (A) Ubicación del punto sobre el cráneo de la rata, donde entrará la cánula y en el cual se basa el diseño de la montura.....	50
Figura 42. Diagrama esquemático de un sistema completo de registro de actividad neuronal	51

Figura 43. Tarjeta electrónica de desarrollo MC-3300-RV de New Scale Technologies	52
Figura 44. Diagrama de flujo del sistema de control del <i>microdrive</i>	53
Figura 45. Concepto del control del motor SQL-RV-1.8 con el driver NSD-2101	54
Figura 46. Funcionamiento del motor SQL-RV-1.8 en lazo abierto. Gráfica que muestra la cantidad de movimiento (avance) en diferentes iteraciones, todas con el mismo número de pulsos alimentados por el NSD-2101.	57
Figura 47. Experimento para caracterizar el sensor A1324 montado en un proyector de perfiles (NIKON Profile).....	59
Figura 48. Parámetros considerados en el experimento para caracterizar el sensor de efecto Hall A1324	60
Figura 49. Señal proporcionada por el sensor A1324 leída con el ADC-10bits para una carga de desplazamiento de 2064 μ m.	60
Figura 50. Proyección del perfil de la cánula y orientación del sistema de referencia para realizar las mediciones de los desplazamientos.....	62
Figura 51. Forma de onda obtenida a partir de la información del sensor mientras el pistón se mueve a lo largo de toda la carrera de desplazamiento del <i>microdrive</i>	63
Figura 52. Ajuste de curva de la señal sensor.....	64
Figura 53. Interfaz gráfica de usuario para controlar al <i>Microdrive</i>	65
Figura 54. Diagrama esquemático de conexiones del sistema electrónico de control.	69
Figura 55. Tarjeta electrónica para el control del <i>microdrive</i>	69
Figura 56. Vista comparativa del ensamble final de la nueva propuesta de <i>microdrive</i> y su hardware de control.	70
Figura 57. Orientación de la cánula para medir los errores con respecto a la trayectoria lineal deseada.....	72
Figura 58. Desviaciones lineales en y y x de la trayectoria producida por la cánula cuando se encuentra desplazándose.....	72
Figura 59. Diagrama de dispersión, de la posición deseada con la posición real y recta de regresión.	74
Figura 60. Errores residuales de la posición real con respecto a la aproximación lineal. ...	75

Figura 61. Histograma de los errores residuales de la posición real con respecto a la deseada..... 76

Figura 62. Diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición sensada y recta de regresión..... 77

Figura 63. Errores residuales de la posición sensada con respecto a la aproximación lineal. 77

Figura 64. Histograma de los errores residuales de la posición sensada con respecto a la deseada..... 78

Figura 65. Errores residuales de la posición real y la posición sensada con respecto a la aproximación lineal 78

Figura 66. (A) Comparación del desplazamiento medido por el sistema de sensado y el por el proyector de perfiles en 30 posiciones diferentes. (B) Errores de posición sensada con respecto a la posición real..... 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de desplazamiento respecto a diferentes tipos de actuadores.	22
Tabla 2. Nuevos actuadores clasificados en términos de sus parámetros de entrada.....	23
Tabla 3. Ventajas y desventajas de motores piezoeléctricos ultrasónicos.....	26
Tabla 4. Técnicas de medición de desplazamientos en sistemas micromecánicos	32
Tabla 5. Especificaciones de los motores piezoeléctricos SQL-RV-1.8 SQUIGGLE y TULA-50	37
Tabla 6. Componentes y características generales para la construcción de la propuesta final.	47
Tabla 7. Lista de registros del NSD-210 los cuales pueden ser abordados a través de la interfaz I ² C.....	55
Tabla 8. Resultados de experimentos para la caracterización del A1324.	59
Tabla 9. Características generales de microcontroladores.....	66
Tabla 10. Características generales del PIC16F726	67
Tabla 11. Componentes del sistema electrónico del <i>microdrive</i>	68
Tabla 12. Resultados de la aproximación lineal del diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición real.	74
Tabla 13. Resultados de la aproximación lineal del diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición sensada.	76
Tabla 14. Volumen del nuevo sistema de posicionamiento de microelectrodos.....	80
Tabla 15. Peso del nuevo sistema de microposicionamiento de microelectrodos.....	80

INTRODUCCIÓN

La mejor manera de obtener información de la actividad neuronal en animales pequeños con libertad de movimiento es introduciendo microelectrodos en el área de interés. Esta información es muy útil para los investigadores en neurociencias, ya que con ello se busca conocer los efectos directos que producen los fármacos sobre las neuronas y los procesos de sinapsis, u observar y medir los efectos de estimulaciones químicas y eléctricas aplicadas directamente sobre el tejido cerebral [1]. Tales estudios, se basan en análisis e interpretación de la correlación que hay entre actividad eléctrica y conducta motora. Estos experimentos se hacen con diversos animales, incluyendo pájaros y ratas [4], [5]. Las ratas son los animales más utilizados, debido a que son fáciles de manejar y son muy resistentes a las infecciones.

Con el fin de posicionar los microelectrodos dentro del cerebro de la rata, varios dispositivos se han desarrollado, estos comúnmente son llamados *microdrives*. Algunos *microdrives* consisten en un tornillo de avance, el cual desplaza los microelectrodos a lo largo de la zona de interés. Cada vez que se pierde la señal de la actividad neuronal, los microelectrodos deben ser llevados a una nueva posición, por lo cual la rata es sometida y el tornillo debe ser girado manualmente con un destornillador [4]-[8]. La automatización de este procedimiento es una manera de evitar la manipulación del animal. Pero esto genera otras desventajas, tales como el aumento de tamaño y de peso de los *microdrives*, debido básicamente a los actuadores y mecanismos. Aun así, se han propuesto *microdrives* basados en micromotores DC (Corriente Directa) y motores paso a paso operados mediante un control en lazo abierto [11], [12]. Sin embargo, la complejidad del mecanismo, el tamaño y el peso siguen siendo los principales problemas.

Para evitar el uso de motores, también se han propuesto *microdrives* basados en sistemas hidráulicos [10]. No obstante, el movimiento es en una sola dirección y sus dimensiones son excesivas para ser soportado por la cabeza de la rata. En los últimos años, los actuadores piezoeléctricos han evolucionado disminuyendo en tamaño, peso y costo. Estas características hacen que este tipo de actuadores sean una buena opción para ser utilizados en dichas aplicaciones. El uso de actuadores piezoeléctricos accionados mediante un control *on-off* se traduce en dispositivos con buena resolución y se ha demostrado que los sistemas basados en este tipo de actuadores permiten obtener señales eléctricas provenientes de neuronas de ratas que se mueven libremente [13], [14].

Los especialistas del área de neurofisiología tienen la necesidad de contar con sistemas motorizados para tener movimientos controlados y posicionar de manera automática los microelectrodos en zonas específicas y con avances micrométricos, lo cual hace necesario un sistema de control con monitoreo de la posición [15].

A continuación se presenta un trabajo donde se expone el desarrollo de un nuevo *microdrive* basado en un micromotor piezoeléctrico. El diseño propuesto se basa en un mecanismo sencillo de pocos elementos. El tamaño y el peso del *microdrive* lo hacen adecuado para ser fijado en la cabeza de ratas y ratones. Además, tal *microdrive* incorpora un sistema de posicionamiento automático.

El contenido de este trabajo se desglosa en cinco capítulos. En el *capítulo 1* se da una breve explicación de la actividad neuronal y se abordan algunos experimentos de electrofisiología en animales vivos, esto con el fin de dar un panorama general de las técnicas de microposicionamiento de microelectrodos que se han desarrollado.

En el *capítulo 2* se plantea el problema y se da el objetivo y los alcances de este trabajo. Por otra parte, en el *capítulo 3* se presenta un marco teórico referente a los aspectos generales del microposicionamiento y los actuadores piezoeléctricos.

A lo largo del *capítulo 4* se describe el diseño y el desarrollo del sistema de microposicionamiento (*microdrive*), comenzando con la justificación del uso de un motor piezoeléctrico y terminando con el desarrollo de la tarjeta electrónica de control para el sistema. En el *capítulo 5* se describen los resultados de las pruebas realizadas al sistema.

Finalmente, se presenta una sección de conclusiones y el trabajo a futuro donde se analiza el estatus de este trabajo.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

En el mundo, la innovación tecnológica ha avanzado con rapidez hasta el grado de estar presente en las diferentes etapas del desarrollo humano. En el área de la medicina y la salud, la tecnología se ha presentado teniendo un gran impacto y buscando proporcionar el mejor diagnóstico y el tratamiento más eficaz. Por ello y debido a la demanda que existe por parte de las ciencias de la salud para hacer investigación, la ingeniería se ha involucrado de manera íntima. Esta integración ha ayudado en la lucha contra las enfermedades, proporcionando herramientas o dispositivos que pueden utilizarse para la investigación, el diagnóstico y el tratamiento de las mismas; y así, solucionar los problemas que enfrenta la sociedad moderna. El propósito de este capítulo es proporcionar una visión general del desarrollo de dispositivos que apoyan directamente en el área de la neurociencia, buscando la solución a los problemas que se presentan particularmente en estudios de electrofisiología.

1.1 Electrofisiología de la neurona

La electrofisiología se refiere al estudio de las propiedades eléctricas de las células y los tejidos biológicos. Es la ciencia interesada en la medida o el registro del cambio de voltaje o corriente eléctrica que se produce en un simple canal iónico o en órganos completos. El entendimiento básico de la electrofisiología es fundamental para apreciar las funciones del sistema neuronal y el cerebro en general.

Las neuronas son células especializadas en la integración y la propagación de eventos eléctricos. Es debido a esta actividad eléctrica que las neuronas se comunican con otras neuronas, con músculos y otros órganos. A nivel celular, la actividad eléctrica de las neuronas consiste en el movimiento de las cargas eléctricas (iones) a través de la superficie de sus membranas. La membrana de la célula tiene un espesor de 7 a 15 nm (nanómetros) y está compuesta principalmente de lípidos, los cuales son elementos que no permiten el flujo iónico. Sin embargo, las membranas también contienen otras proteínas que forman poros o canales (llamados canales iónicos) entre la membrana lipídica. La capacidad que tienen estos canales para permitir el flujo de iones depende de varios factores, como son: el potencial eléctrico que existe en la membrana, la misma naturaleza de los canales, los receptores, la cantidad de iones que se crean en la membrana (llamado gradiente) y otros neurotransmisores y hormonas [1].

La membrana celular está positivamente cargada en la parte exterior y negativamente en el interior, como se muestra en la Figura 1. Esta separación de la carga y los canales iónicos son responsables del potencial de la membrana. En la neurona, la diferencia de potencial a través de la membrana celular es de aproximadamente 60mV (milivolts) a 90mV dependiendo de la célula en particular. Por convención, la referencia (0V o tierra) se encuentra fuera de la neurona [2].

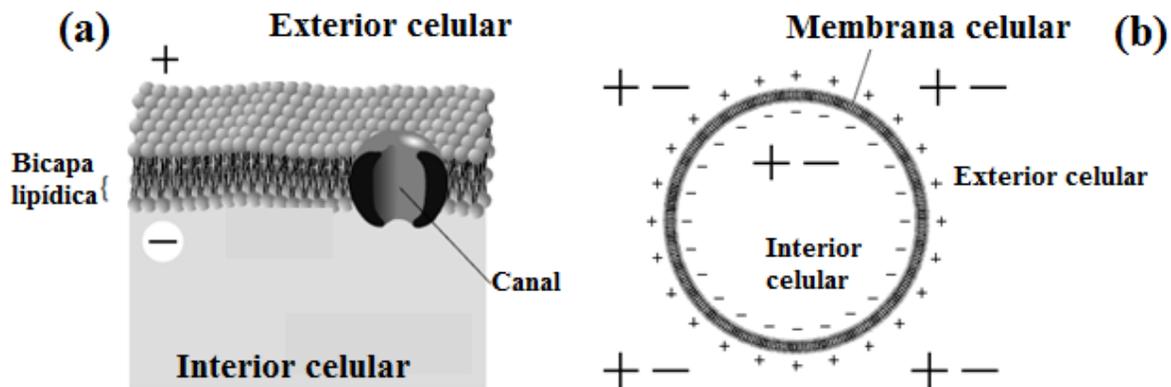


Figura 1. Diagramas que ilustran la separación de las cargas entre la membrana celular. (a) Membrana de la célula con iones positivos en el exterior y negativos dentro de la superficie de la membrana. (b) Separación de las cargas. Los iones que se encuentran en la superficie interna y externa de la membrana son los únicos responsables del potencial eléctrico de la membrana [2].

En la membrana, cuando un canal iónico se “abre”, el tránsito iónico es a favor de su gradiente electroquímico. Es decir; se pretende equilibrar el número de iones independientemente del potencial actual en la membrana. Este mecanismo de movimiento iónico permite el tránsito entre el estado de polarización y despolarización. Cuando hay un cambio muy rápido en la polaridad de la membrana de negativo a positivo y de vuelta a negativo, en un ciclo que dura unos milisegundos, se produce un impulso el cual comúnmente es llamado potencial de acción (Figura 2).

Cuando el potencial llega al extremo de la membrana debe pasar a la siguiente neurona. En un principio se pensaba que las membranas de las neuronas estaban en contacto con otras, de manera que la señal podía pasar directamente de una a otra, pero cuando el sistema nervioso se estudió con más detalle se observó que las neuronas están separadas por pequeños espacios. Por lo tanto, para que la señal llegue a otra neurona es necesaria una sustancia química denominada neurotransmisor, esta sustancia es la encargada de llevar la información hasta la otra neurona, lo cual se logra gracias a una transformación de energía química a eléctrica. Esta conexión entre una neurona y otra mediante la liberación de un neurotransmisor se llama sinapsis.

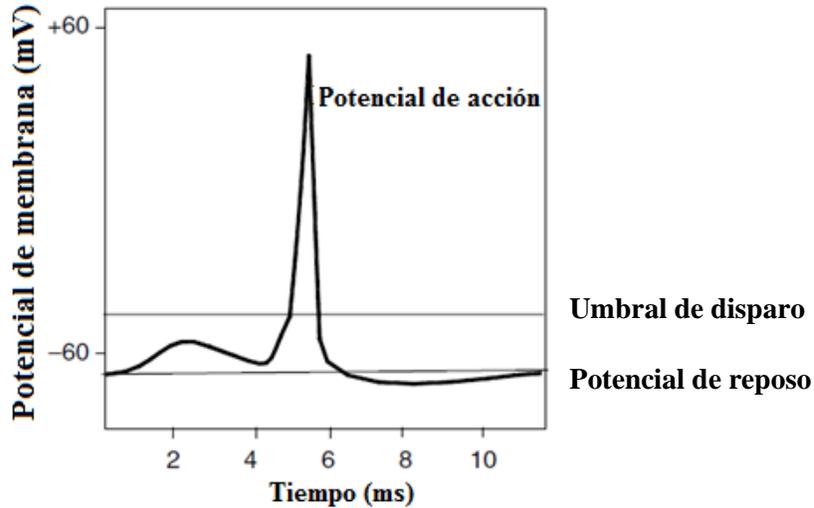


Figura 2. Diagrama de un potencial de acción con sus distintas fases [2].

1.2 Electrofisiología neuronal en animales vivos

El funcionamiento del cerebro es mayormente explorado en animales a partir del registro o grabación de los potenciales de acción, cuya información es obtenida mediante microelectrodos.

La mayoría de los estudios en electrofisiología implican grabación de señales eléctricas provenientes de neuronas individuales. Muchos investigadores están interesados en las funciones de regiones específicas del cerebro, por ello, sus experimentos están basados en el registro de los potenciales de acción. Esta actividad eléctrica es registrada de manera extracelular por medio de microelectrodos y la mayoría de estos experimentos son realizados con algunos animales en comportamiento libre, entre ellos: monos, pájaros y ratas [3]-[5]. Siendo las ratas, los animales más utilizados por varias razones, primero porque son fácilmente manipulables y su tamaño es adecuado para tenerlo en los laboratorios; en segundo lugar, las ratas generalmente son muy resistentes a las infecciones y finalmente, una serie de razas puras están disponibles comercialmente (la raza Wistar es la más utilizada).

Para realizar estos experimentos, primero el animal es anestesiado y puesto en un sistema estereotáxico donde la cabeza del animal es orientada, posicionada y restringida en un sistema coordinado de tres dimensiones con escala milimétrica, esto permite situar un punto particular en el cráneo para ser perforado. Este punto se define a partir de la zona del cerebro en la cual el investigador desea hacer el registro de la actividad eléctrica. La definición del punto se realiza tomando como referencia una guía llamada Atlas Estereotáxico. Esta guía describe un detallado conjunto de secciones del cerebro (ver Figura 3), donde cada sección puede ser identificada dentro de unas coordenadas externas marcadas de forma natural en el

cráneo del animal, algunas de esas referencias son un punto llamado bregma, que es el vértice en el que convergen los huesos frontales y parietales, otro punto de referencia es llamado lambda y es definido por la unión de otras suturas en el cráneo tal como se muestra en la Figura 4 [6].

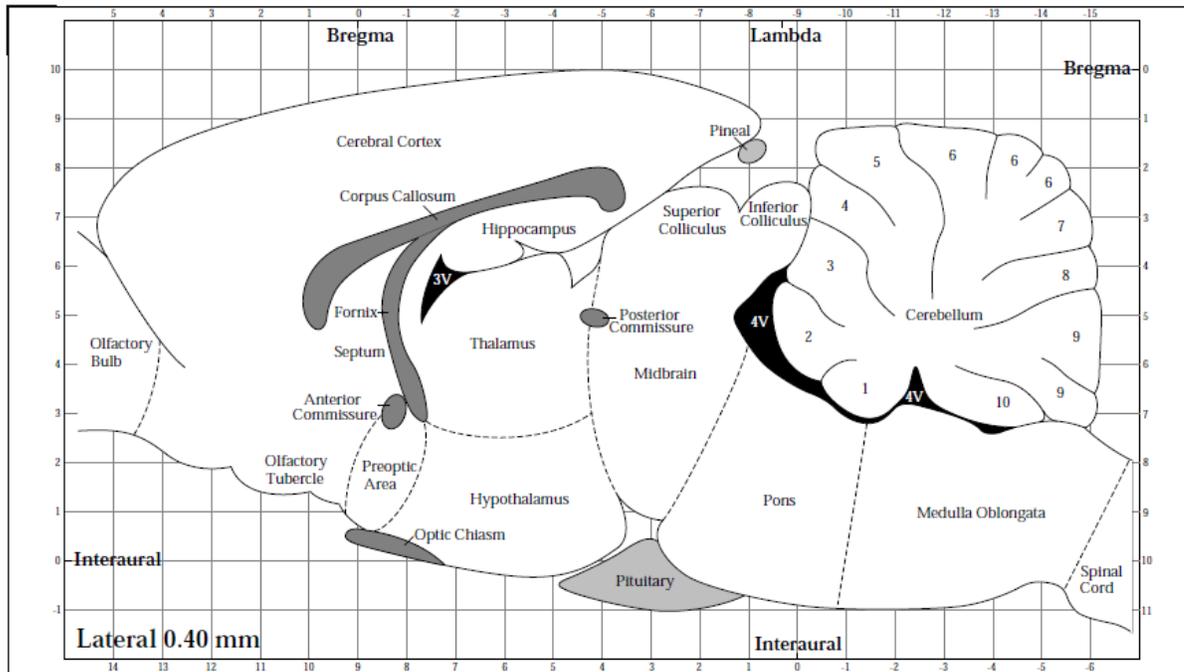


Figura 3. Corte sagital del cerebro de la rata. Las principales regiones del cerebro se pueden ver en este diagrama, por lo cual puede utilizarse como una guía aproximada para ubicar la posición de las secciones del cerebro. También se muestran los puntos de referencia del cráneo (bregma, lambda, y la línea interaural) [6].

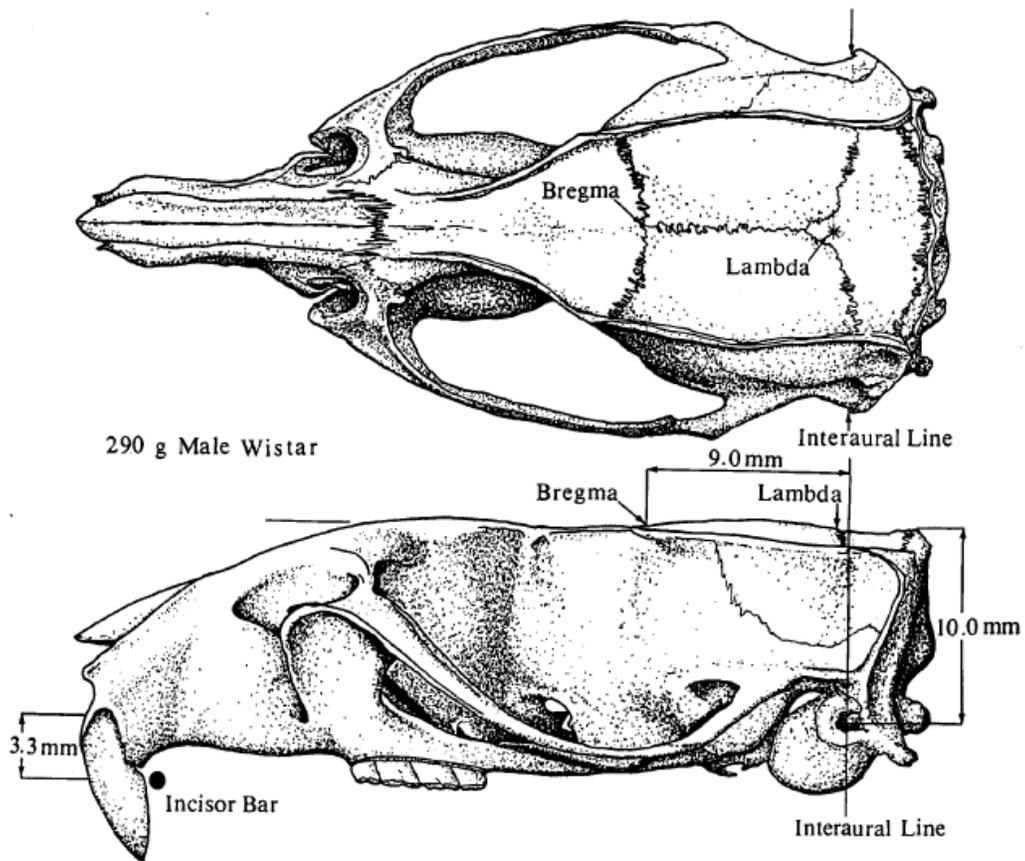


Figura 4. Vista superior y lateral del cráneo de una rata de la raza Wistar con 290 g de peso. Las posiciones de bregma, lambda y el plano de la línea interaural son mostradas en estos diagramas. En la vista lateral del cráneo se muestra la distancia entre el plano horizontal superior y la línea interaural (10 mm), también se ve la distancia entre la barra de incisión y el plano horizontal (3.3 mm) que pasa en la línea interaural [6].

Una vez que el cráneo es perforado, los microelectrodos son introducidos al cerebro con la ayuda de una cánula-guía, es decir; un arreglo de microelectrodos se introduce y se fija dentro un tubo, de tal manera que la cánula evita que los microelectrodos se doblen o se desvíen cuando penetran en el cerebro. El descenso de la cánula se hace hasta conseguir el registro de los potenciales de acción, lo cual sucede cuando la punta de un microelectrodo se posiciona lo suficientemente cerca de la neurona para conseguir la grabación de la actividad eléctrica extracelular [1].

1.2.1 Ventajas y desventajas de la electrofisiología neuronal en animales vivos

Los experimentos de electrofisiología unicelular en animales vivos permiten estudiar regiones del cerebro o neuronas en su estado o medio natural. Esto da oportunidad de hacer investigación con la finalidad de dar respuestas a preguntas e hipótesis que se hacen en el campo de las neurociencias y que requieren de la investigación en órganos “intactos”. Existe una diversidad de aplicaciones experimentales de electrofisiología unicelular en animales vivos, las cuales se realizan con el objetivo de estudiar los efectos directos de fármacos sobre las neuronas y los procesos de sinapsis, o para observar y medir los efectos de estimulaciones químicas y eléctricas que se aplican directamente sobre el tejido cerebral. Otro motivo de estos experimentos es el de analizar y encontrar la correlación que existe entre actividad eléctrica y conducta motora [1].

Son muchas las ventajas que generan estos de experimentos. Pero en el proceso también se presentan complicaciones, una de ellas es la dificultad que se tiene para calcular las cantidades de sustancias que son necesarias en el experimento, como anestésicos y concentraciones de medicamentos. Otro inconveniente es el estrés y la alteración del comportamiento natural del animal que se produce por someterlo y manipularlo para introducir y fijar los microelectrodos. Por si fuera poco, con frecuencia se pierde la señal de la actividad y es necesario manipular nuevamente al animal para reubicar los microelectrodos. Tampoco se descarta el hecho de que estos estudios son lentos, técnicamente difíciles y requieren de un largo entrenamiento. Todas estas complicaciones producen desconfianza de los resultados obtenidos y conllevan en algunos casos al fracaso de los experimentos.

Con el propósito de posicionar de manera controlada y con precisión los microelectrodos dentro del cerebro de las ratas, se han desarrollado algunas técnicas y dispositivos. A continuación se presentan algunos ejemplos de ellos.

1.3 Dispositivos de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en ratas (*Microdrives*)

El registro de actividad neuronal en ratas vivas implica el posicionamiento de microelectrodos. Se ha experimentado fijando los microelectrodos manualmente, pero esta técnica carece de resolución espacial. Además, el movimiento de los tejidos del cerebro y las variaciones graduales durante la colocación generan dificultad para la obtención de señales eléctricas. Para superar este problema y prolongar los tiempos de monitoreo se han

desarrollado algunos sistemas que son capaces de generar el avance de los microelectrodos. A estos sistemas de desplazamiento lineal comúnmente se les llama *microdrives*.

1.3.1 *Microdrives* manuales

Los *microdrives* “manuales” se han utilizado ampliamente, estos se basan en un tornillo de potencia y una tuerca o cremallera [4], [7]-[9]. El avance de los electrodos se logra cuando se hace girar el tornillo dentro de la tuerca, con un destornillador o con la mano. Un ejemplo es el que se publicó en el año 2003 por David K. Bilkey, *et. al* del Departamento de Psicología de la Universidad de Otago en Nueva Zelanda [4]. Dicho sistema puede posicionar un arreglo de 8 microelectrodos con ayuda de un mecanismo, el cual funciona como sigue: un tornillo y un elemento de plástico roscado funcionan como los elementos que accionan al sistema (Figura 5); cuando el tornillo gira también avanza y empuja a la punta de un bolígrafo, a su vez, la punta transmite el movimiento a otro elemento de plástico, el cual se desplaza llevando consigo a los electrodos. La punta del bolígrafo tiene la tarea de aprovechar únicamente el desplazamiento y despreocuparse del movimiento de rotación del tornillo. Todos estos componentes están guiados por un tubo de aluminio como se ve en la siguiente figura.

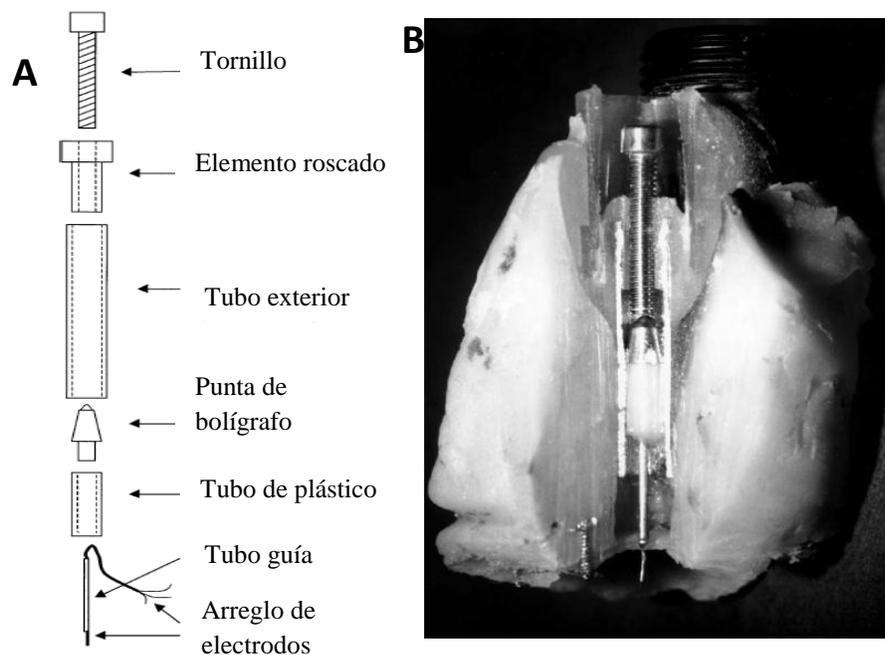


Figura 5. *Microdrive* manual desarrollado en 2003 en la Universidad de Otago. (A) Diagrama de los componentes que constituyen el *microdrive* manual. (B) Fotografía que muestra el *microdrive* colocado dentro de un implante de cemento dental, el cual permite fijar el dispositivo al cráneo de la rata. Una sección del implante y una parte del dispositivo se han cortado para exponer los componentes internos [4].

Este *microdrive* puede mover microelectrodos en un rango de 1 a 2 mm (milímetros) con avances en incrementos de $20\mu\text{m}$ (micrómetros). El diámetro externo del tubo de aluminio es de 3.15mm, la altura del dispositivo completo es de 22 mm y tiene un peso total de 0.39g (gramos).

En la Figura 6 y Figura 7 se muestran otros dos *microdrives* manuales que funcionan bajo el mismo principio. En el primero de ellos, el elemento que se traslada no es el tornillo sino un elemento roscado fabricado con cemento dental, el cual desplaza a cuatro electrodos guiados por tubos. Otro elemento de la misma naturaleza ubicado en la parte de abajo guía el desplazamiento de los electrodos cuando descienden. Este elemento también funciona como un rodamiento para un extremo del tornillo y soporta dos ejes cilíndricos que le dan estructura a este *microdrive* (Figura 6). Dicho *microdrive* mueve los electrodos con avances de $250\mu\text{m}$, lo equivalente a una rotación del tornillo en sentido antihorario, el dispositivo se utilizó experimentando con ratas y ratones con la cabeza sujeta y consiguió registrar señales eléctricas [8].

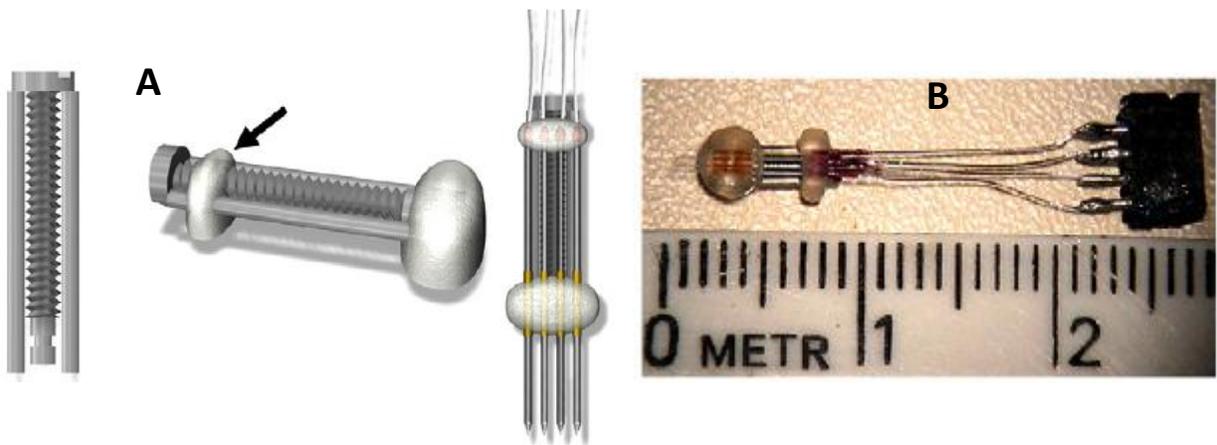


Figura 6. *Microdrive* manual con elementos de cemento dental. (A) Componentes y procedimiento de fabricación del *microdrive*. (B) Fotografía del *microdrive* con la integración de un conector y una referencia en cm. Este *microdrive* se desarrolló en Alemania y fue dado a conocer alrededor del año 2010 [8].

El otro *microdrive* manual funciona de la misma manera hasta ahora descrita, con la aportación de que este dispositivo incorpora dos tornillos más para generar desvíos laterales en los electrodos y aumentar las probabilidades de obtención de actividad neuronal (Figura 7). Al experimentar con este dispositivo, los incrementos aplicados en el avance de los microelectrodos fueron de $500\mu\text{m}$. El *microdrive* tiene una forma adecuada para ser cargado por la cabeza de una rata sin dificultades [9].

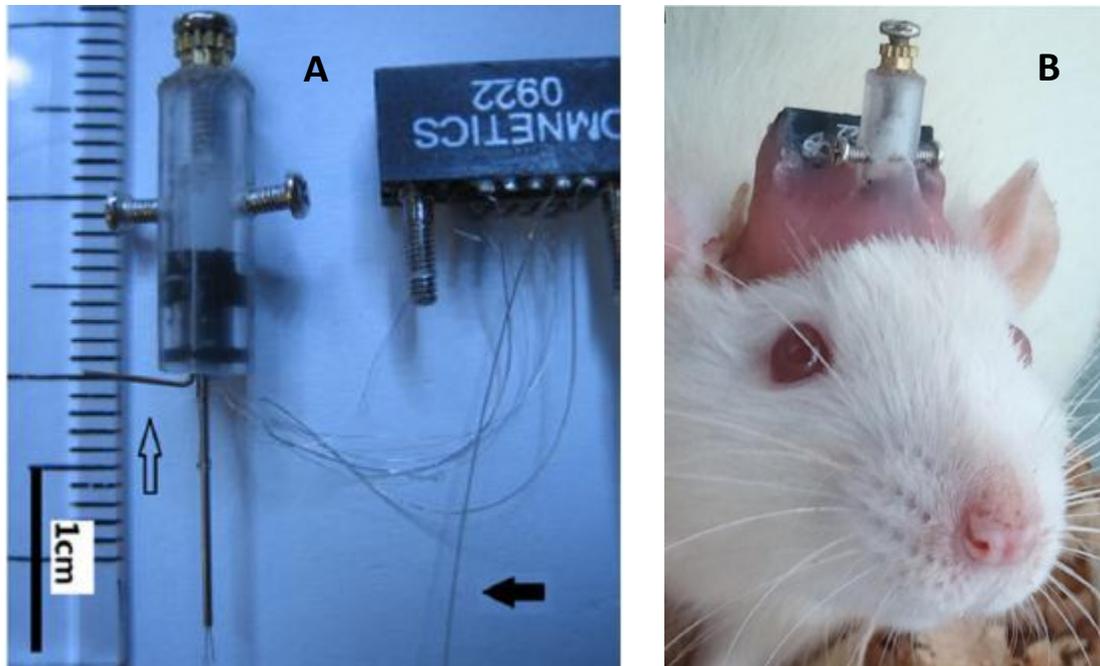


Figura 7. *Microdrive* manual publicado en Mayo 2014 . (A) muestra el arreglo de microelectrodos guiados por un tubo y soldados a un conector de 10 pines. (B) es la vista frontal del microdrive implantado en el cerebro de la rata. [9]

Los *microdrives* manuales presumen de ser baratos, de pequeñas dimensiones y garantizan un avance preciso de los electrodos, además, pueden ser construidos con elementos estándar mediante un proceso donde no se requiere gran tecnología.

1.3.2 *Microdrives* automáticos

Se ha visto hasta ahora que uno de los problemas que se presenta comunmente en los experimentos para registrar actividad neuronal en animales vivos, es la pérdida de la señal, este problema es causado por las vibraciones que genera el animal cuando se encuentra en libre movimiento o por los golpes que recibe el sistema cuando la rata intenta de quitárselo con las patas. Si se utilizan *microdrives* manuales y se pierde el registro de actividad, entonces es necesario someter al animal para reubicar los electrodos.

Los *microdrives* automáticos eliminan la necesidad de manipular al animal para reposicionar los microelectrodos. Este proceso de automatizar los *microdrives* implica el uso de actuadores y mecanismos, por lo que incrementa el tamaño y el peso de los *dispositivos*, esto no es conveniente porque le genera algunas molestias en animal, altera su comportamiento natural y puede darse el caso en que la información registrada durante los experimentos no sea útil.

Para evitar el uso de un motor y su acoplamiento, en [10] fue propuesto un *microdrive* basado en un sistema hidráulico. El sistema se desarrolló tomando como principal motivación el simplificar la forma de posicionar los electrodos; es decir, se pensó que el hecho de no incluir un motor podía dar oportunidad al desarrollo de un *microdrive* con dimensiones mínimas y de poco peso, cubriendo así los requerimientos para la recolección actividad neuronal en animales pequeños. El dispositivo tiene forma de cilindro y es capaz de introducir hasta 22 microelectrodos. Dicho sistema es accionado mediante el control de la presión de un fluido y el movimiento es en una sola dirección. Los principales elementos que integran este sistema se pueden ver en la Figura 8.

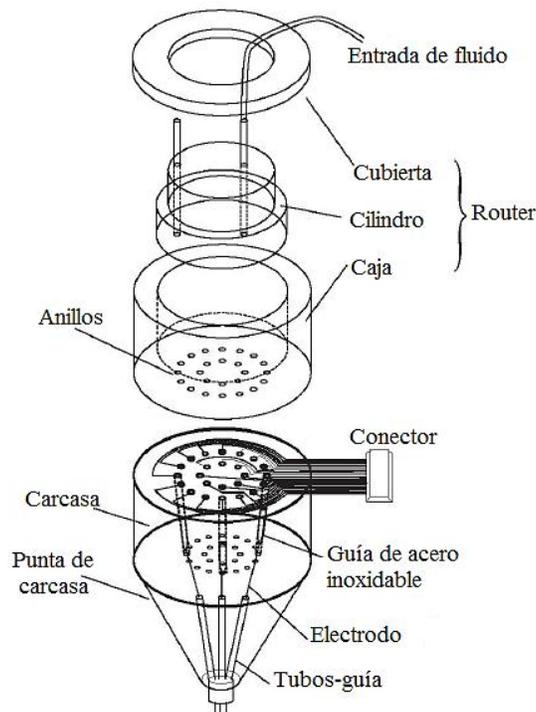


Figura 8. Vista general del *microdrive* hidráulico[10].

Otras propuestas se basan en micromotores de corriente directa (DC) y motores a pasos. Una de estas propuestas es el *microdrive* motorizado desarrollado en U.S.A. por el Departamento de Investigación Biológica y Computación perteneciente a Laboratorios Bell, este sistema es capaz de posicionar 3 electrodos en el cerebro de aves (pinzones). El *microdrive* forma un cilindro de aproximadamente 6mm de diámetro, 16mm de alto y tiene un peso total de 1.5g. El sistema está formado de 3 subsistemas iguales, cada uno de ellos implementa un motor DC de 1.9 mm de diámetro y cada uno pesa aproximadamente 100mg. En el eje de cada uno de los motores, se encuentra acoplado un tornillo para transmitir el movimiento, los microelectrodos descienden o ascienden dependiendo del sentido de giro[11]. En la Figura 9 se ve una fotografía de este sistema.



Figura 9. *Microdrive* con motores DC. Vista lateral del *Microdrive* completo cargado con electrodos y listo para su implantación. Una capa de acrilico se aplica a la parte inferior de la unidad para fijar el *Microdrive* en el cráneo [11].

Un sistema basado en un micromotor de pasos, fue expuesto en el 9° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM9) por el laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México. Al implementar un motor a pasos se tiene control en la posición, ya que los movimientos son repetibles, el ángulo de rotación es proporcional a pulsos digitales de entrada y se tiene un control sencillo de lazo abierto. Lo dicho representa una ventaja con respecto a los *Microdrives* mencionados hasta el momento.

El motor está acoplado a un tren de engranes y a un tornillo sin fin, con lo cual se consiguieron desplazamientos de aproximadamente de $5.47\mu\text{m}/\text{paso}$ en un rango de desplazamiento de 3 mm siendo esto útil para la recolección de actividad neuronal. Por otra parte sus dimensiones no son las ideales (20mmx20.5mmx20.2 mm y 10g de peso) [12]. En la siguiente figura se ve el *Microdrive* con motor a pasos.

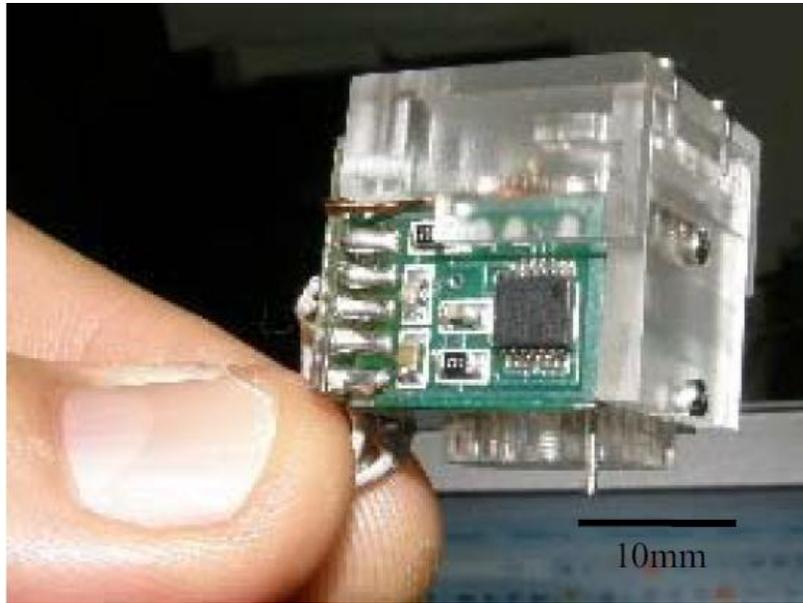


Figura 10. *Microdrive* basado en un motor a pasos [12].

En los últimos años, los actuadores piezoeléctricos han evolucionado, disminuyendo en tamaño, peso y costo. Estas características hacen de este tipo de actuadores una buena opción para ser empleados en esta aplicación. El uso de estos actuadores se puede traducir en dispositivos con los que se pueden obtener movimientos más finos y con mayor resolución que con motores DC y/o a pasos. En [13] se presenta un *microdrive* basado en un actuador piezoeléctrico, este dispositivo es capaz de obtener señales neuronales de una rata moviéndose libremente. Las dimensiones y el peso de este dispositivo son apropiadas. Sin embargo, no es capaz de obtener desplazamientos precisos con un control de lazo abierto. Para superar este problema, posteriormente se incorporó un sistema de control de la posición en lazo cerrado [15]; de esta manera se obtuvo un dispositivo que tiene la ventaja de mover microelectrodos con una resolución nanométrica. Este último se puede ver en la Figura 11.

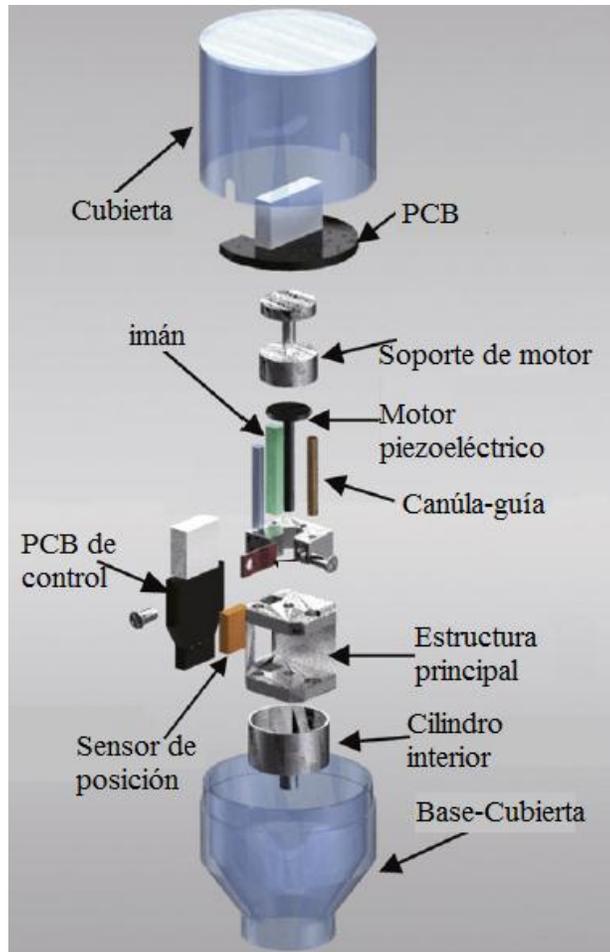


Figura 11. *Microdrive* basado en un motor piezoeléctrico. En esta imagen se observa el diseño, las piezas y modo de ensamble. El sistema sin la etapa electrónica de control pesa 1.82 g y forma un cilindro de 15 mm de diámetro y 24.5 mm de altura [15].

Capítulo 2

OBJETIVO Y ALCANCES

El registro de actividad eléctrica neuronal en animales vivos permite estudiar regiones del cerebro en su estado o medio natural. Con ello se busca conocer los efectos directos de los fármacos sobre las neuronas y los procesos de sinapsis, observar y medir los efectos de estimulaciones químicas y eléctricas que son aplicadas directamente sobre el tejido cerebral y analizar la correlación que hay entre actividad eléctrica y conducta motora entre otras [1].

Por lo anterior y debido a la demanda que se tiene en este campo de investigación, se ha buscado desarrollar técnicas que permitan registrar señales eléctricas neuronales de animales despiertos en libre movimiento, comúnmente en ratas, estas técnicas generalmente necesitan de dispositivos, los cuales permitan introducir los microelectrodos en el tejido cerebral.

2.1 Planteamiento del problema

En la Figura 12 se presenta un diagrama esquemático de todas las etapas necesarias para conseguir el registro de actividad neuronal en ratas vivas. En este esquema, se observa que el sistema completo se divide en dos subsistemas: el primer subsistema se encuentra encerrado en un recuadro de línea punteada y corresponde al sistema de microposicionamiento, el cual tiene el objetivo de posicionar los microelectrodos en el cerebro del animal controlando los avances desde una PC (Personal Computer). El otro subsistema corresponde al sistema de adquisición de datos y es el encargado de acondicionar las señales y llevarlas hasta una computadora, donde posteriormente se realiza su interpretación. El desarrollo de este trabajo se centra en el subsistema de microposicionamiento.

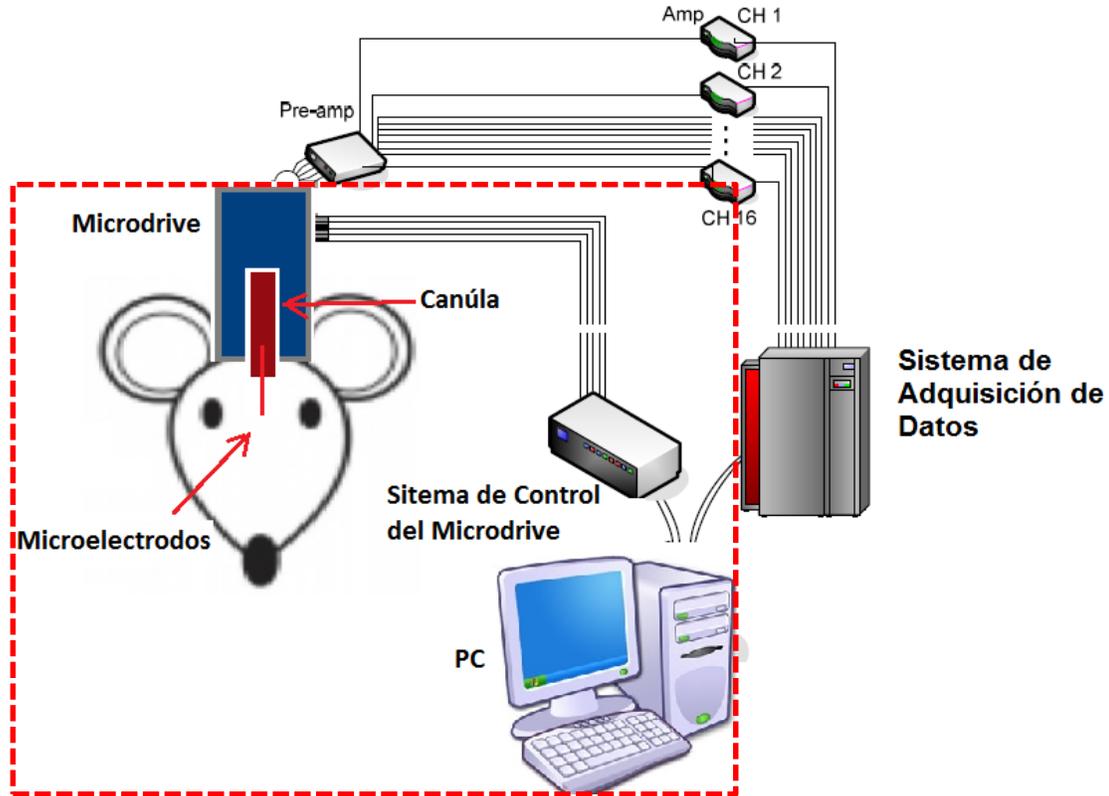


Figura 12. Diagrama esquemático de un sistema completo de registro de actividad neuronal [15]. El recuadro de línea punteada delimita el sistema de microposicionamiento y el resto corresponde al sistema de adquisición de las señales eléctricas de las neuronas.

Considerando propiamente el subsistema de microposicionamiento y los antecedentes, se sabe que introducir los electrodos y pegarlos de alguna manera no es una técnica viable, debido a que no se tiene resolución espacial y es difícil registrar actividad neuronal. Los *Microdrives* basados en un mecanismo accionado manualmente han sido los más utilizados, son baratos, pequeños, de fácil fabricación y garantizan un avance preciso de los electrodos. Sin embargo, cuando se pierde el registro de la señal eléctrica, es necesario someter al animal y reposicionar los electrodos, lo cual altera la conducta natural del animal y genera incertidumbre en los experimentos. Los *microdrives* automáticos evitan la manipulación constante del animal, pero la automatización implica el uso de actuadores y mecanismos que incrementan el tamaño y el peso de los *microdrives*.

Experimentalmente se ha encontrado que una rata de la raza Wistar con un peso entre 200 y 320g puede contener sobre su cabeza un peso de hasta 14g y un ratón de aproximadamente 25g soporta una carga de hasta 5g. Estos datos deben ser considerados para el desarrollo de *microdrives* automáticos. Los *microdrives* descritos en [13] y [14] cumplen con esta especificación, pero el comportamiento de los incrementos en el avance de los microelectrodos no es lineal, por lo que no se tiene total control. Para garantizar o aumentar

las probabilidades de encontrar actividad neuronal, son necesarios avances menores a $10\ \mu\text{m}$ en un rango de 3 mm [4]. En [15], un *microdrive* con control de la posición en lazo cerrado cumple con las características anteriores, pero su altura (25mm) resulta ser una característica que incomoda al animal en el momento de la experimentación, de modo tal que, el volumen juega otro papel importante en las características deseadas de los *microdrives* y es un factor crítico para conseguir exitosamente el registro de la actividad neuronal.

Dicho lo anterior y tomando en cuenta como parte de la motivación a la evolución y miniaturización de actuadores y sensores, en este trabajo se presenta una nueva propuesta de un sistema de microposicionamiento de electrodos para registrar actividad neuronal en ratas.

2.2 Objetivo

Diseñar, construir y controlar un sistema de posicionamiento que sea capaz de mover microelectrodos con resolución micrométrica para registrar la actividad eléctrica de células neuronas en ratas con libertad de movimiento.

2.3 Alcances

- Dar un contexto sobre las propiedades eléctricas de las células neuronas.
- Investigar acerca de estudios de actividad neuronal en animales vivos.
- Indagar sobre dispositivos y técnicas utilizadas para registrar actividad neuronal, particularmente con el microposicionamiento de electrodos.
- Diseñar un mecanismo, que permita desplazar un arreglo de microelectrodos de forma longitudinal sin desvíos.
- Seleccionar un microactuador para accionar el sistema de microposicionamiento.
- Implementar un sistema de control lazo cerrado para controlar la posición del sistema.
- Programar una interfaz de usuario que permita controlar y monitorear la posición del arreglo de electrodos.
- Realizar pruebas para evaluar los desplazamientos.
- Concluir con base en los resultados obtenidos y plantear el trabajo a futuro.

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

Un actuador es un dispositivo que genera desplazamiento mecánico o una fuerza a partir de cierta energía de entrada. La demanda de nuevos actuadores ha incrementado en los últimos años, principalmente la de pequeños motores. Esta demanda es por parte de sistemas ópticos, astronómicos y de maquinado de precisión por mencionar algunos. Todas estas necesidades se centran en el campo del posicionamiento, los sistemas de posicionamiento tienen necesidades en cuanto a precisión. Algunos de los ejemplos son, la evolución de las impresoras, las cuales requieren de sistemas para eliminar errores de backlash o en el caso de las cámaras fotográficas de autoenfoco, que necesitan de longitudes focales precisas.

3.1 Métodos convencionales de microposicionamiento

Los métodos convencionales de microposicionamiento implican mecanismos para evitar el juego mecánico. Kenji Uchino y Jayne R. Giniewicz (2003) presentan estos métodos en tres grupos. El primer grupo se basa en mecanismos de reducción de desplazamientos accionados por presión hidráulica o neumática. Estos mecanismos generalmente reducen el desplazamiento de salida con respecto al de entrada cambiando el diámetro del cilindro por donde pasa el fluido. En la Figura 13 se ilustra el principio de funcionamiento de estos mecanismos.

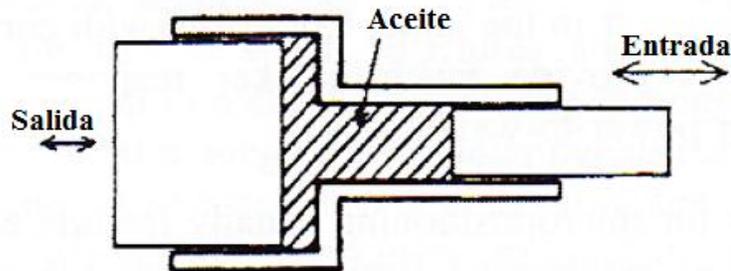


Figura 13. Diagrama de mecanismo de reducción de desplazamiento accionado por presión hidráulica o neumática [16].

El segundo grupo corresponde a la combinación de un motor con un mecanismo de reducción. Comúnmente, el movimiento angular del motor es transformado a desplazamiento

lineal a través de una tuerca y un tornillo de potencia (ver Figura 14). Si se incorporan cojinetes o rodamientos exactos, se pueden obtener posicionamientos de hasta $5\mu\text{m}$ en un rango de 100mm .

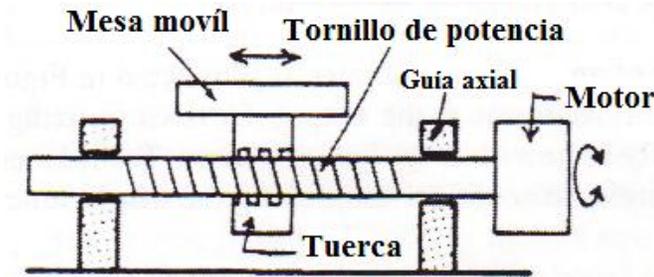


Figura 14. Ilustración de un mecanismo de desplazamiento basado en un tornillo de potencia [16].

La tuerca y el tornillo de potencia también se pueden combinar con otros mecanismos de reducción de desplazamiento, por ejemplo, las cuñas, resortes con deformación constante y cuerpos rígidos deformables (mecanismo de flexión). En la Figura 15 se ilustran estos mecanismos.

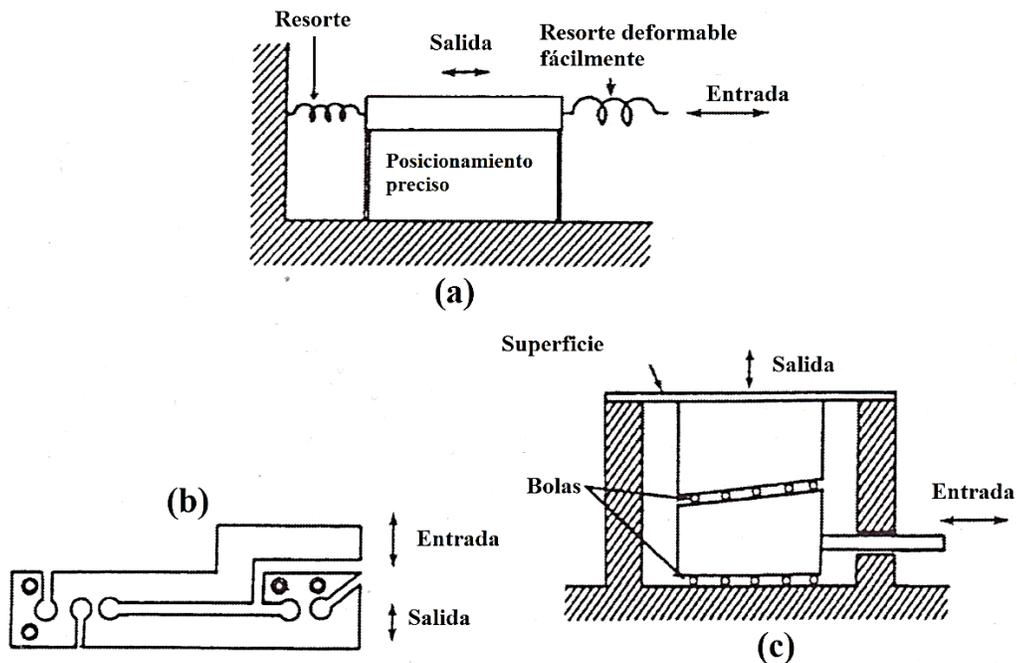


Figura 15. Mecanismos de reducción de posicionamiento basados en un resorte con deformación constante (a), en deformación de cuerpos rígidos (mecanismo de flexión) (b) y en cuñas (c) [16].

Esta combinación de un motor con un mecanismo de reducción tiene la ventaja de tener una respuesta rápida y buen control, pero la estructura es difícil de construir en miniatura debido las tolerancias de fabricación, las cuales generan el juego mecánico. Además, los motores eléctricos útiles para este caso son más grandes que 1cm, motores más pequeños producen generalmente un torque de apenas $7.5\mu\text{Nm}$ y velocidades aproximadas a 100 000 rpm. Para aumentar el par del motor y disminuir la velocidad podría pensarse en utilizar un arreglo de engranes sin embargo, si se redujera la velocidad unas 47 veces apenas se obtendrían $300\mu\text{Nm}$ y se reduciría la eficiencia del motor [16].

El tercer método es basado en motores de bobina de voz, los cuales generan un movimiento de deslizamiento debido al capo magnético que se produce cuando fluye la corriente por la bobina. A pesar de que estos motores logran desplazamientos con mucha precisión, consumen mucha energía, su respuesta es lenta y las fuerza que producen son pequeñas. En la Figura 16 se muestra una representación de estos motores.

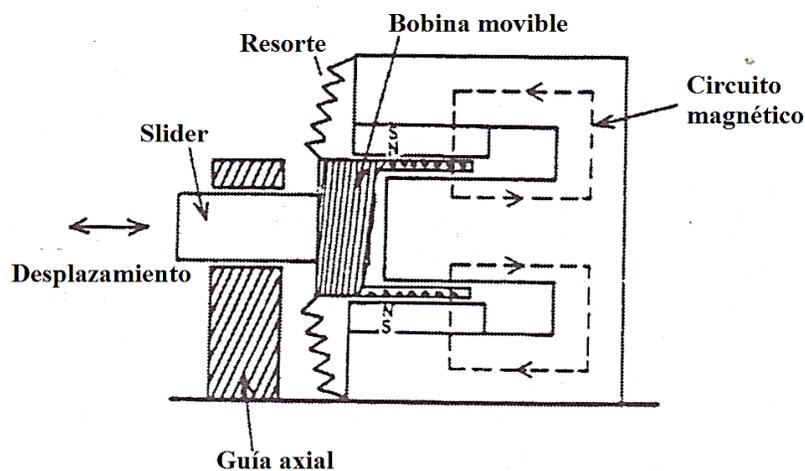


Figura 16. Esquema de un motor basado en una bobina de voz [16].

Los métodos de posicionamiento se reflejan resumidos en la Tabla 1, la cual muestra algunas de las características de desplazamiento con respecto a varios tipos de actuadores. Al final de la tabla también se observa un nuevo grupo, el cual pertenece al desplazamiento generado por nuevos actuadores, este grupo presenta mejores características en comparación con los otros tres.

Tabla 1. Características de desplazamiento respecto a diferentes tipos de actuadores [16].

Forma de Controlar	Dispositivo	Rango/ carrera	Resolución	Torque/ Fuerza	Tiempo de respuesta
Presión de aire	De desplazamiento angular	Rotación	Grados	50Nm	10s
	De desplazamiento longitudinal	100mm	100 μ m	10 ⁻¹ N/mm ²	10s
Presión de aceite	De desplazamiento angular	Rotación	Grados	100Nm	1s
	De desplazamiento longitudinal	1000mm	10 μ m	100N/mm ²	1s
Electricidad	Servomotor AC	Rotación	Minutos	30Nm	100ms
	Servomotor DC	Rotación	Minutos	200Nm	10ms
	Motor de pasos	1000mm	10 μ m	300N	100ms
	Motor de bobina de voz	1mm	0.1 μ m	300N	1ms
Nuevos Actuadores	Piezoeléctricos	100 μ m	0.01 μ m	30N/mm ²	0.1ms
	Magnetostrictivo	100 μ m	0.01 μ m	100N/mm ²	0.1ms
	Motores ultrasónicos (piezoeléctricos)	Rotación	Minutos	1Nm	1ms

3.2 Nuevos actuadores

Los nuevos actuadores se pueden clasificar en términos de su parámetro de entrada. La mayoría de los elementos móviles en estos nuevos actuadores, son controlados por cambios en parámetros “externos”, como la temperatura y los campos magnéticos o eléctricos. Los actuadores activados por temperatura aprovechan las expansiones térmicas, los actuadores basados en materiales magnetostrictivos los campos magnéticos y los actuadores basados en materiales piezoeléctricos aprovechan los campos eléctricos. La Tabla 2 muestra una clasificación de los nuevos actuadores con respecto a su parámetro de entrada.

Tabla 2. Nuevos actuadores clasificados en términos de sus parámetros de entrada [16].

Parámetro de entrada	Tipo de actuador/dispositivo
Campo Eléctrico	Piezoeléctrico/Electrostrictivo Electrostático (Silicio MEMS) Fluido electroreológico
Campo Magnético	Magnetostrictivo Fluido Magnetorreológico
Presión/Esfuerzo	<i>Rubbertuator</i> (actuador elástico)
Calor	Aleación con memoria de forma
Luz	Fotostrictivo Manipulador de luz laser
Químico	Mecanoquímico Metal-hydrite

3.2.1 Motores piezoeléctricos

Los motores piezoeléctricos son actuadores de estado sólido, es decir; generan un movimiento mecánico macroscópico a través de la amplificación y repetición de microdeformaciones de materiales activos. En estos motores electrocerámicos, la conversión de energía eléctrica a mecánica se realiza por medio del efecto piezoeléctrico inverso.

Los motores electrocerámicos se pueden clasificar en resonantes o forzados dependiendo del tipo de excitación. La excitación periódica del motor, con una frecuencia de resonancia, provoca la amplificación mecánica y por lo tanto movimientos de rotación o traslación. Estos movimientos son mayores comparados con los movimientos generados por motores de excitación forzada. Los motores de excitación forzada generan movimientos limitados y muy pequeños, si se desean aumentar la magnitud de los movimientos, es necesario hacer una superposición de motores o disponer de multiplicadores mecánicos [17]. Estos últimos generalmente son utilizados para aplicaciones donde se requieran desplazamientos nanométricos. Por otro lado, los motores resonantes o ultrasónicos generan mayor cantidad de movimiento y velocidades mayores, por lo que son ampliamente utilizados en sistemas mecatrónicos.

3.2.1.1 Motores ultrasónicos

Los motores resonantes son actuadores ultrasónicos que transmiten la energía mecánica por fricción, las principales partes que conforman un motor ultrasónico se pueden ver en la Figura 17. En general, el principio de funcionamiento de estos motores consiste en crear un movimiento elíptico en el punto de contacto entre el rotor/deslizador y estator para generar el movimiento de rotación o traslación.

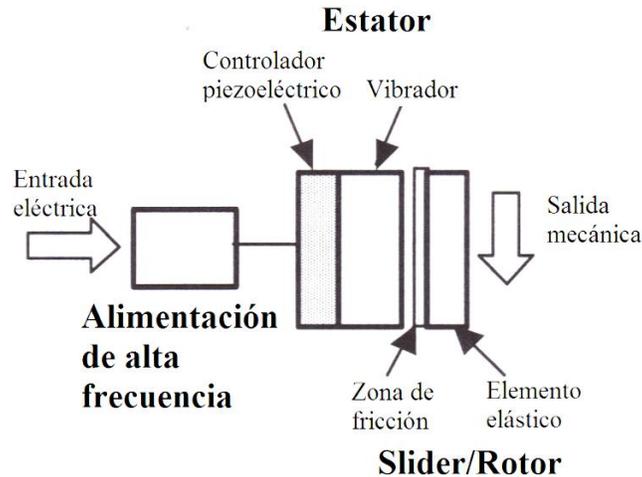


Figura 17. Estructura básica de un motor ultrasónico [16].

Para producir el movimiento elíptico entre el rotor/deslizador y el estator, estos motores requieren de un voltaje de entrada o una excitación en forma periódica, lo cual se transforma en una vibración inducida sobre el estator del motor. Estas vibraciones se pueden inducir de dos formas distintas; ya sea con ondas estacionarias o con ondas viajeras, pero ambas a frecuencias ultrasónicas. Una onda viajera tiene un perfil que se mueve con el tiempo a través del medio. Por otra parte, la onda estacionaria es aquella que se da en un medio reducido, como lo hacen las vibraciones de una cuerda de guitarra.

En [16] se dice que para lograr el movimiento elíptico en el punto de contacto entre el estator y rotor/deslizador, los motores de onda estacionaria utilizan un acoplador piezoeléctrico vibratorio. Este acoplador cuenta con un vibrador piezoeléctrico y una punta vibratoria que hace contacto directo con el rotor o deslizador (ver Figura 18 (a)). Cuando se excita un desplazamiento en el vibrador piezoeléctrico, la punta vibratoria es flexionada debido a que es orientada en un pequeño ángulo (θ) respecto a la horizontal. Lo anterior produce un movimiento de la punta a lo largo y sobre la superficie del rotor o deslizador entre los puntos A y B como se ve en la Figura 18(b). Si la frecuencia de resonancia de la punta vibratoria se ajusta a la frecuencia de resonancia del vibrador piezoeléctrico y la deformación o flexión en la punta es pequeña en comparación con su longitud, el movimiento de la punta del punto B al punto A en el plano x-y está dado por:

$$x(t) = u_0 \sin(\omega t + \alpha) \quad y \quad y(t) = u_1 \sin(\omega t + \beta)$$

Lo cual produce un lugar geométrico en forma de elipse. El torque en el rotor entonces es transmitido sólo cuando la punta va del punto A al punto B.

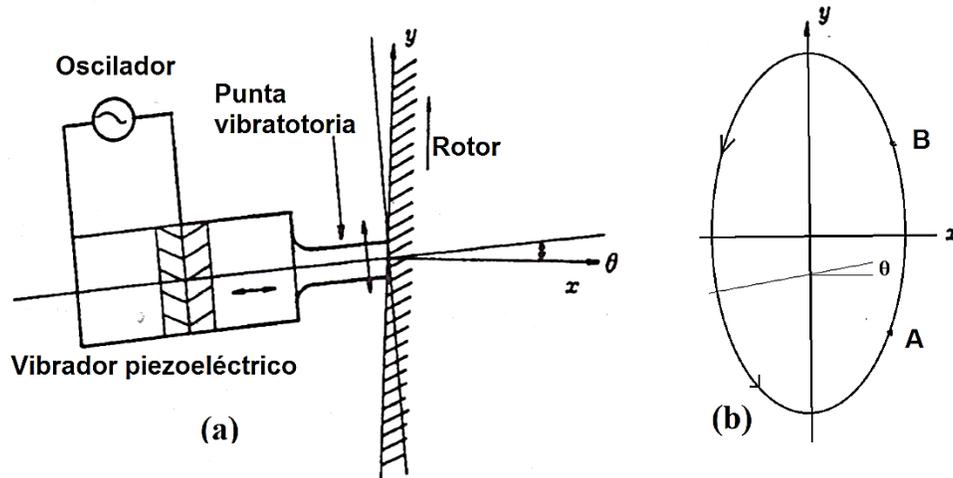


Figura 18. Motor de acoplador vibratorio. (a) Configuración del sistema y (b) lugar geométrico generado por la punta de la pieza vibratoria [16].

Por otra parte, una onda viajera puede ser producida por la superposición de dos ondas estacionarias desfasadas entre si 90 grados. Dentro de los motores ultrasónicos están los “motores de onda viajera”, llamados así por su tipo de excitación, estos se basan en las características de dichas ondas para generar el movimiento. La onda viajera se propaga a través de un cuerpo elástico como se ve en la Figura 19. Las partículas de la superficie realizan un movimiento elíptico debido a la interacción de las ondas longitudinales y transversales. Estos motores necesitan de dos elementos vibratorios para generar la onda viajera (dos ondas estacionarias) y el cambio de rotación o deslizamiento se logra intercambiando la diferencia de fase de 90 a -90 grados. Este tipo de motores tiene menos eficiencia comparados con los de onda estacionaria, debido a las pérdidas de fricción causadas por movimientos radiales que aparecen adicionalmente.

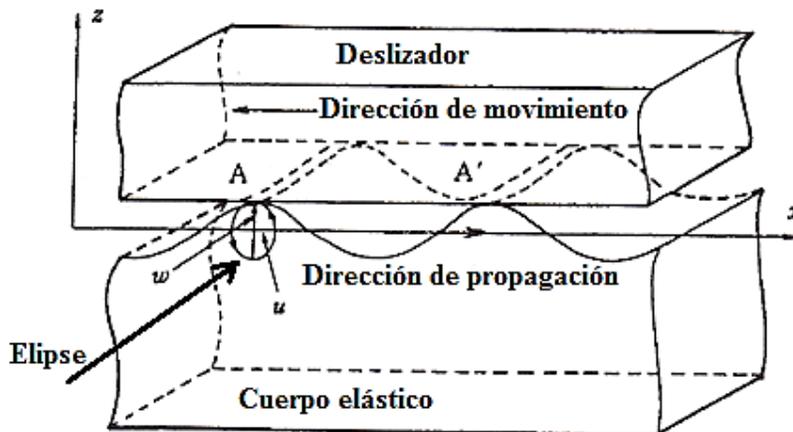


Figura 19. Principio de funcionamiento del motor de onda viajera [16].

Existen motores resonantes tanto lineales como rotativos; en ambos la velocidad va de la mano con el torque. El hecho de que produzcan un movimiento lineal o angular e incluso mixto, dependen básicamente de la estructura de cada motor. En la Figura 20 se presentan dos ejemplos: en la primera estructura (a) dos elementos piezoeléctricos llamados placa x y placa y están unidos al eje de un motor, dicho eje girar respecto a z cuando estos elementos son excitados con ondas viajeras. Si el eje de dicho motor es roscado, entonces se genera un movimiento mixto de traslación y rotación; la segunda estructura (b) es un ejemplo de un motor lineal en “forma de π ”, el cual “camina” cuando las vibraciones producidas por la excitación del piezoeléctricos son transmitidas a lo largo de sus “piernas” [16]. El gran torque y el poco tamaño que tienen estos motores son sus principales ventajas pero, necesitan de alimentación a frecuencias controladas para su funcionamiento. En la Tabla 3 se enlistan otras ventajas y desventajas de los motores ultrasónicos.

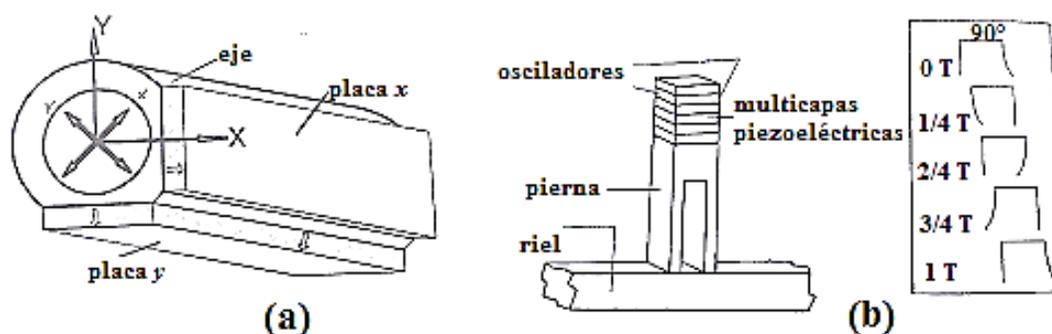


Figura 20. Ejemplo de estructuras de motores rotativo y lineal. (a) los elementos piezoeléctricos x e y transmiten vibraciones al cilindro provocando que gire. (b) Las vibraciones inducidas generan flexiones en las piernas del elemento en forma de π generando el avance [16].

Tabla 3. Ventajas y desventajas de motores piezoeléctricos ultrasónicos [16].

Ventajas	Desventajas
➤ Torque grande	➤ Torque vs. caída de velocidad
➤ Rápida respuesta	➤ Corta vida
➤ Rango de velocidades	➤ Requiere alimentación a altas frecuencias.
➤ Resoluciones finas para posición	➤ Histéresis
➤ Tamaño compacto y poco peso	
➤ Estructura simple	
➤ No genera radiación electromagnética	
➤ No son afectados por campos magnéticos o eléctricos externos.	

3.2.1.2 Motores forzados

Los motores forzados también llamados de transmisión directa o de desplazamiento rígido son actuadores constituidos por placas delgadas apiladas de material cerámico piezoeléctrico, cada una de las placas está polarizada en el sentido de su espesor, de modo que las placas adyacentes tienen polaridad opuesta. El arreglo de placas es sometido a tratamientos térmicos para obtener una estructura rígida, en medio de cada dos placas hay un electrodo, de tal manera que se forma un circuito en paralelo tal como se ve en la Figura 21. Este arreglo genera la suma de desplazamientos con voltajes de excitación reducidos que generalmente son constantes.

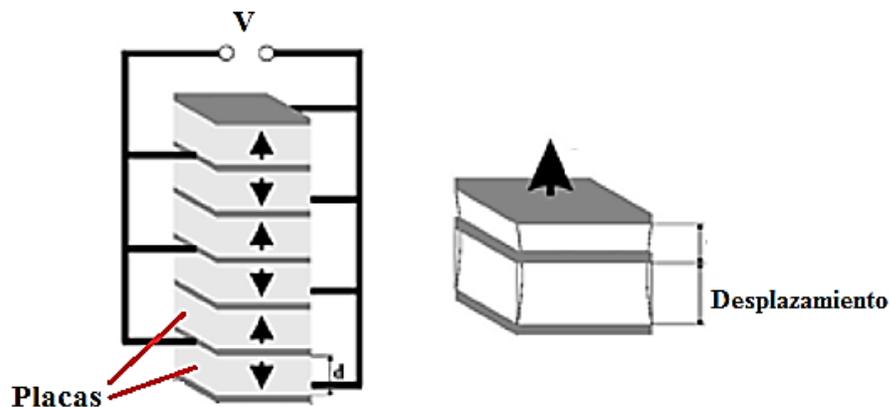


Figura 21. Actuador lineal constituido por placas cerámicas piezoeléctricas y su modo de desplazamiento. [17].

Los actuadores de transmisión directa necesitan de mecanismos para aumentar la cantidad de desplazamiento, sin embargo, estos motores pueden dar solución a problemas de posicionamiento donde se necesiten resoluciones de desplazamiento nanométricas. Los actuadores multicapa también son capaces de transmitir fricción a otros elementos para generar un actuador rotativo, pero generalmente son más caros comparados con los ultrasónicos.

3.3 Técnicas de control para actuadores piezoeléctricos

Los métodos para el control de motores piezoeléctricos son dependientes del funcionamiento del motor, es decir, dependen del tipo de excitación y de la deformación inducida que requieren dichos motores. Estos métodos de control pueden ser divididos en dos categorías: la primera categoría es la correspondiente a la de los actuadores de

desplazamiento rígido, los cuales son excitados por medio del control de corriente directa (DC); la segunda categoría es la correspondiente a la de los actuadores resonantes (motores ultrasónicos), los cuales son excitados por medio de una corriente alterna (AC) con frecuencia de resonancia mecánica. En la Figura 22 se ilustran las dos categorías y se observa que la primera es dividida en dos tipos: servosistemas de desplazamiento y sistemas controlados en *ON-OFF*.

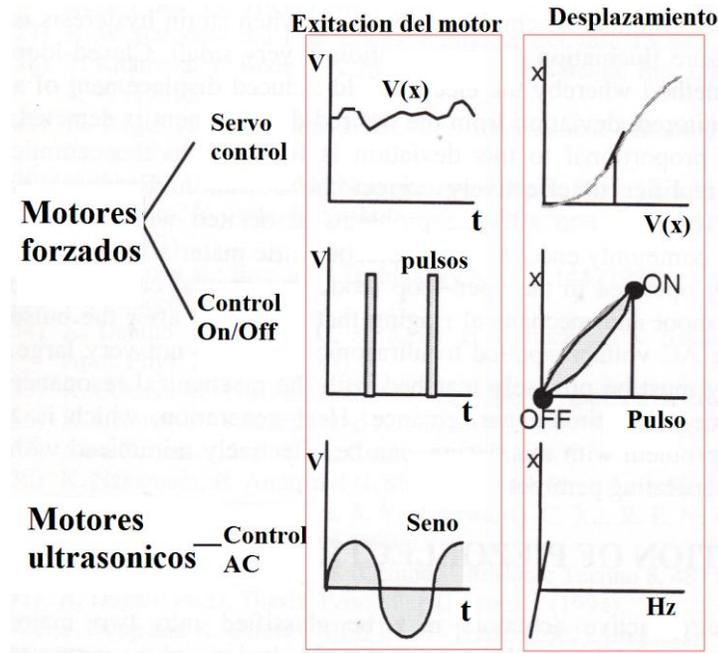


Figura 22. Clasificación de motores piezoeléctricos basada en el voltaje de excitación. El desplazamiento generado por los motores depende del tipo la excitación del motor, la cual a su vez dependen del tipo de deformaciones inducidas que requieren para su funcionamiento [16].

En el caso de los servosistemas de desplazamiento también llamados sistemas de posicionamiento, la señal de alimentación del motor es generada por un sistema de control con realimentación de la posición. El controlador puede ser diseñado por las diferentes técnicas de control automático, en este caso la mayor dificultad es obtención del modelo matemático del actuador debido a que depende de su estructura y su funcionamiento, en la página 221 de [16] se presenta un ejemplo.

El otro tipo corresponde a los motores accionados por pulsos, estos actuadores usualmente son operados bajo un control de lazo abierto. La cantidad de movimiento que producen depende de la cantidad de pulsos (vibraciones en el piezoeléctrico). Este método de control genera errores debido a las mismas características del funcionamiento de los motores basados en materiales piezoeléctricos, el fenómeno de histéresis que se presenta en el proceso de deformación de los piezoeléctricos es una de las causas de los errores. Es difícil lograr un posicionamiento rápido y preciso en sistemas controlados por pulsos debido a la inercia

mecánica, sin embargo se pueden obtener buenos resultados con un control *on-off* para aquellas necesidades donde no se requiera mucha precisión.

Por otro lado, los actuadores resonantes no requieren de grandes voltajes, pero sí de altas frecuencias. La respuesta de estos actuadores no es directamente proporcional al voltaje aplicado, más bien depende de la frecuencia, entre más cerca esté la frecuencia de excitación a la frecuencia resonante de vibración, el motor tendrá un mejor rendimiento. Tales actuadores son capaces de producir movimientos muy rápidos debido a las altas frecuencias de excitación. Sin embargo, el principal inconveniente en este método de control es precisamente producir la excitación con las frecuencias deseadas, afortunadamente existen algunos controladores programables implementados en circuitos integrados que están disponibles comercialmente.

3.4 Sensores para sistemas micro-mecatrónicos

Frecuentemente, los actuadores piezoeléctricos son implementados en sistemas de microposicionamiento junto con algunos sensores de desplazamiento. Hay varios métodos para medir desplazamientos micrométricos, todos ellos deben hacerlo con mucha precisión, ya que de esto dependen el control del sistema y la precisión de los desplazamientos producidos. Los métodos de medición de la posición pueden dividirse en dos categorías: los eléctricos y los ópticos; dentro de los métodos eléctricos se encuentran sensores basados en el cambio de resistencia, de inducción electromagnética y de capacitancia. Por otra parte, en el caso de los ópticos, los desplazamientos se pueden medir mediante interferometría y otras técnicas ópticas [16].

3.4.1 Métodos de resistencia

Las galgas extensiométricas tienen una sensibilidad de hasta 10^{-6} y generalmente son utilizadas para medir deformaciones. La galga puede ser pegada en alguna parte del sistema donde se presente una tensión cuando el sistema es accionado. La tensión sobre la galga afecta directamente a su resistencia, estos cambios de resistencia se deben al efecto de la deformación que produce el sistema sobre la galga y al efecto piezoeléctrico del material de las mismas galgas. Los cambios son medidos con ayuda de un puente de Wheatstone y dichos cambios pueden ser relacionados con los movimientos del sistema. En la Figura 23 (a) se presenta la estructura básica de una galga.

Otra manera de monitorear el posicionamiento es por medio de potenciómetros de contacto. Hay dos tipos de sensores potenciómetros; detectores de posición lineal y de

ángulo. La resolución de estos sensores está en función del espesor de un alambre, el cual es mayor a los $10\mu\text{m}$. Los potenciómetros más nuevos presentan una resolución de hasta $0.1\mu\text{m}$ y una respuesta de 100KHz [16].

Por otro lado, los potenciómetros de no contacto se basan en el efecto magneto-resistivo, es decir; la resistencia de materiales semiconductores con los que es fabricado el potenciómetro cambia por la variación de un campo magnético. Estos sensores pueden tener una resolución de hasta $10^{-3}\mu\text{m}$ y tienden a tener larga vida debido a que no están en contacto con elementos móviles, esto también elimina los problemas que surgen por el tiempo de uso. En la Figura 23 (b) se puede ver la estructura general de un potenciómetro magneto-resistivo y un par de imanes para proporcionar el campo magnético.

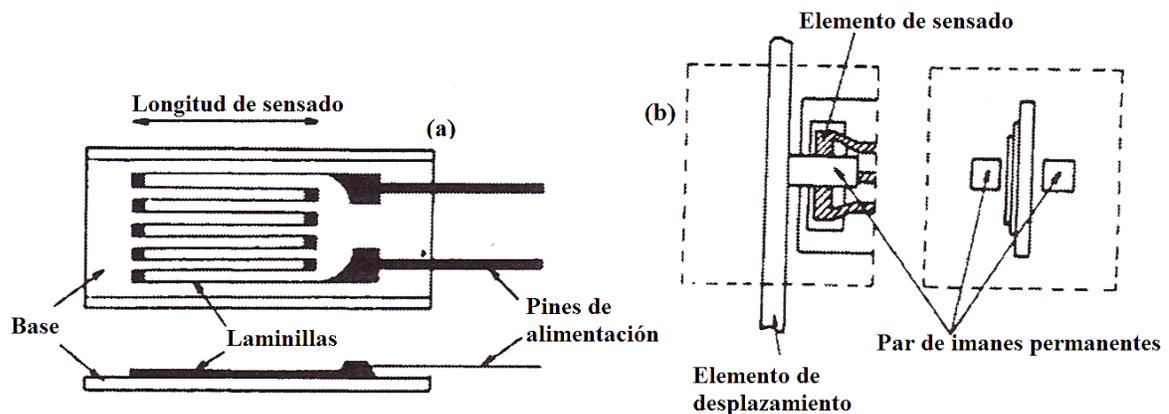


Figura 23. Estructura básica de una galga extensiométrica y un potenciómetro magneto-resistivo

3.4.2 Métodos de inducción electromagnética

En la Figura 24 (a) se presenta el esquema de un transformador diferencial que se compone de dos bobinas iguales y un núcleo magnético. Cuando el núcleo cambia su posición, se genera un cambio en la inductancia de las dos bobinas, este cambio es interpretado como un cambio de posición o un desplazamiento. Un sensor de esta naturaleza presenta una resolución típica de $1\mu\text{m}$, sin embargo con un acondicionamiento de señales se pueden conseguir resoluciones de hasta $10^{-2}\mu\text{m}$ y una velocidad de respuesta de aproximadamente 100Hz .

Otros sensores sin contacto se basan en corrientes Eddy; si se acerca una placa de metal a una bobina por donde fluye una corriente alterna, una corriente Eddy con un flujo en forma de anillo será inducida en la placa de metal. Al mismo tiempo, estas corrientes Eddy generan un campo magnético que se relaciona también con la bobina reduciendo su inductancia, este

cambio de inductancia equivale a un cambio en distancia entre la bobina y la placa de metal. La resolución máxima y tiempo máximo de respuesta se encuentran en el orden de $0.1\mu\text{m}$ y 50kHz respectivamente. En la Figura 24 (b) se muestra la estructura general de un sensor de corriente Eddy.

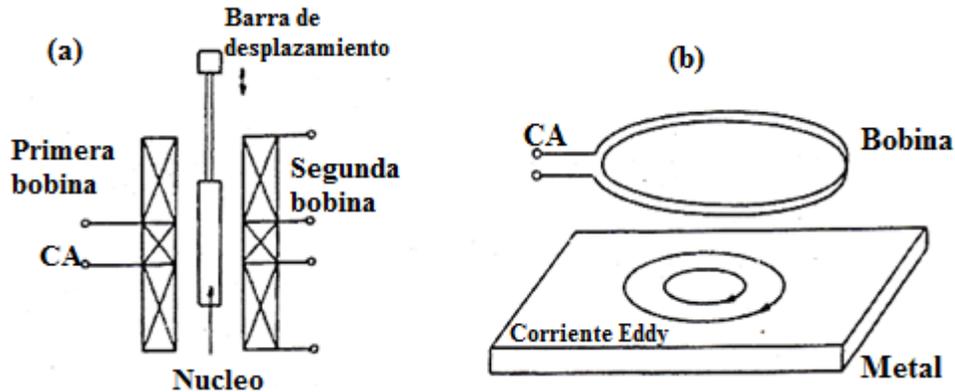


Figura 24. Transformador diferencial (a) y estructura de un sensor de corrientes Eddy (b) [16].

3.4.3 Métodos de capacitancia

La capacitancia de un condensador de placas paralelas relleno de aire cambia linealmente con respecto a la distancia entre las placas; entre dichas placas también existe un campo eléctrico que aumenta cuando las placas son acercadas entre sí mismas. En muchos casos el cambio en porcentaje de capacitancia es pequeño, pero utilizando un puente de capacitancias se pueden detectar los cambios de la capacitancia los cuales corresponden a los cambios de la distancia entre las placas.

3.4.4 Métodos ópticos

Uno de los métodos ópticos utilizados comúnmente para medir desplazamientos en sistemas micro-mecatrónicos es a través interferómetros. Estos instrumentos se componen básicamente de dos haces de luz que recorren trayectorias ópticas distintas determinadas por un arreglo de espejos, los haces de luz son desviados para converger en un punto y formar un patrón de interferencia. Esta deflexión de la luz es medida por diversos métodos produciendo una señal eléctrica, la cual es proporcional a la posición del haz con respecto de los espejos o viceversa. El interferómetro de Michelson permite medir desplazamientos con mucha precisión, su funcionamiento se basa en un arreglo específico de espejos con el que se separa un haz coherente de luz en dos, los dos haces después convergen para generar la

interferencia (ver Figura 25). Midiendo con precisión los cambios de luz generados por la interferencia es posible detectar o medir desplazamientos menores a 1nm.

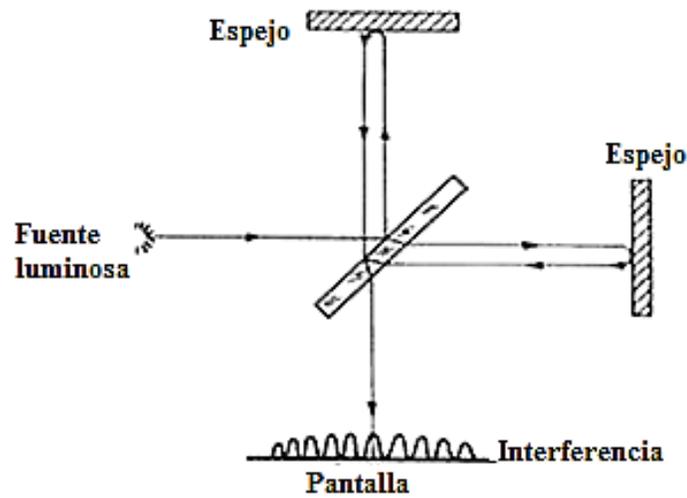


Figura 25. Configuración general de un interferómetro de Michelson [23].

En la Tabla 4 se hace un resumen de técnicas de medición de desplazamientos utilizadas en sistemas micro-mecatrónicos con algunas de sus características.

Tabla 4. Técnicas de medición de desplazamientos en sistemas micromecánicos [16].

Principio	Método	Sensibilidad/Resolución	Respuesta
Resistencia	Galga extensiométrica: Metal Semiconductor	$\Delta l/l=10^{-6}$ $\Delta l/l=10^{-8}$	10MHz 10MHz
	Potenciómetro: Contacto No contacto	$\Delta l=10^{-1}\mu\text{m}$ $\Delta l=10^{-3}\mu\text{m}$	100kHz 1kHz
Inducción electromagnética	Transformador diferencial: AC DC	$\Delta l=10^{-2}\mu\text{m}$ $\Delta l=10^{-1}\mu\text{m}$	100Hz 100Hz
	Corriente Eddy	$\Delta l=10^{-1}\mu\text{m}$	50kHz
Óptica	Interferómetro	$\Delta l=10^{-3}\mu\text{m}$	50KHz

Capítulo 4

DESARROLLO DEL SISTEMA DE MICROPOSICIONAMIENTO (*MICRODRIVE*)

En este capítulo se presenta el procedimiento para el desarrollo del sistema de microposicionamiento. En un principio se plasman los requerimientos y especificaciones y posteriormente se definen las partes que conforman al sistema. Después se describe el diseño y desarrollo de cada uno de los subsistemas, entre ellos se encuentran el sistema mecánico, el sistema de sensado y el control.

4.1 Requerimientos y especificaciones

De acuerdo con la investigación realizada y documentada en el capítulo 1 y con la información proporcionada por investigadores en neurofisiología e ingenieros biomédicos del Centro de Investigaciones Regionales Dr. Hideyo Noguchi de la Universidad Autónoma de Yucatán quienes son los usuarios de este tipo de sistemas, para garantizar o aumentar las probabilidades de encontrar actividad neuronal en ratas, se requiere un sistema de microposicionamiento con las siguientes características:

Requerimientos:

- Se requiere de un dispositivo que permita introducir un arreglo de electrodos guiados por una cánula en el cerebro de una rata.
- El posicionamiento de los electrodos debe ser de forma automática.
- El sistema debe de ser de fácil montaje.
- El sistema debe tener una resolución micrométrica.
- El sistema debe de ser ligero.
- El sistema debe tener un volumen pequeño.
- El sistema debe contar con una interfaz que permita su control desde una PC.

Especificaciones:

- Resolución de 10 μm .
- Carrera del sistema de 3mm.
- Peso menor a 14g.
- Volumen menor o igual al de un cubo de 15mm de arista.

4.2 Diseño del sistema de microposicionamiento

En la Figura 12 fue presentado un diagrama en el cual se encierran con un recuadro rojo todas las partes que componen a un sistema automático de microposicionamiento de electrodos para registrar actividad neuronal. Dicho sistema involucra una computadora, el *microdrive* y el sistema de control. Con base en esto, y considerando los requerimientos y especificaciones, se propusieron y definieron las partes que conformarían al nuevo sistema de microposicionamiento como se ilustra en el diagrama de la Figura 26.

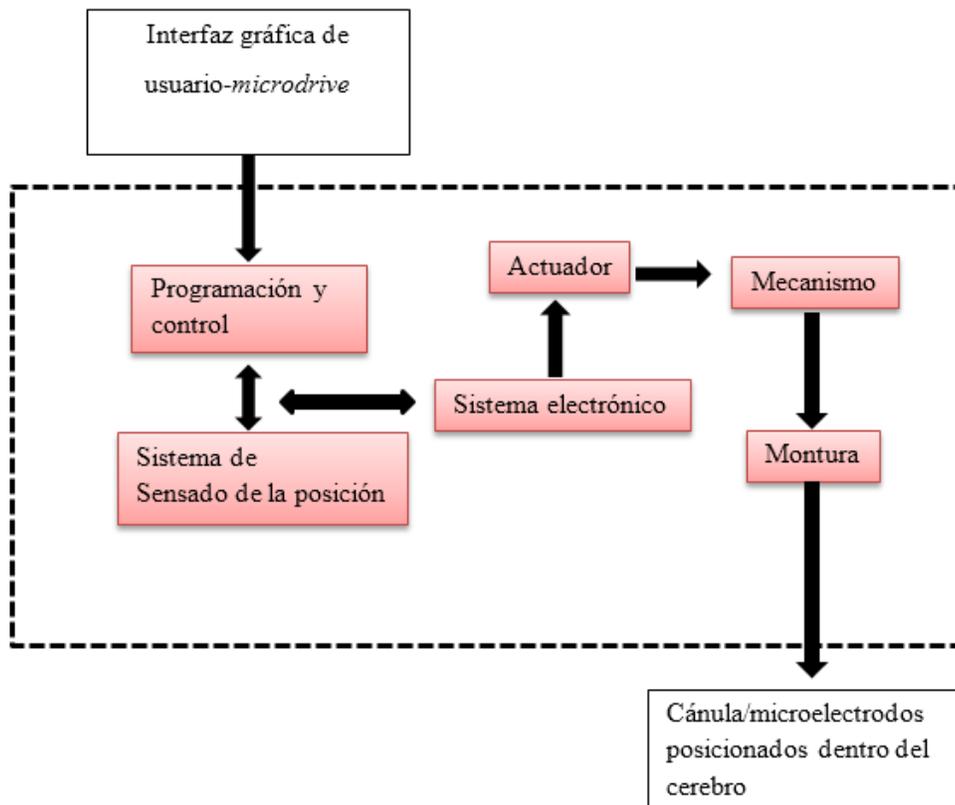


Figura 26. Diagrama que muestra las partes del nuevo *microdrive*.

A continuación se enuncian cada una de las partes:

- Interfaz gráfica de usuario: Su propósito es proporcionar un entorno visual para controlar y monitorear al sistema.
- Programación y control: Parte del sistema que monitorea la posición de los electrodos y decide entre generar o no el avance.
- Sistema de sensado: Sistema encargado de informar sobre la posición de los de electrodos.
- Sistema electrónico: Se refiere a la selección e implementación de los circuitos electrónicos.
- Actuador: Elemento que acciona al sistema o que genera el movimiento.
- Mecanismo: Sistema encargado de transmitir el movimiento al arreglo de electrodos y acoplarse mecánicamente con el actuador.
- Montura: Elemento que permite fijar el *microdrive* al animal.

4.2.1 Diseño del mecanismo y selección del actuador.

El mecanismo es uno de los principales responsables para obtener sistemas de microposicionamiento precisos. Sin embargo, el diseño del mecanismo y la precisión del sistema también dependen en gran medida del actuador. En este caso, para cubrir los requerimientos y especificaciones se deben considerar las dimensiones y el peso tanto del mecanismo como del actuador.

En la Tabla 1 se presentó un panorama general de algunas características de los métodos de desplazamiento en función del tipo de actuador. En esta tabla se observa que los métodos de posicionamiento accionados mediante presión neumática o hidráulica presentan grandes fuerzas de avance, pero las resoluciones de los desplazamientos están por encima de $10\mu\text{m}$ y además, sistemas basados en este método resultan con dimensiones excesivas para esta aplicación, tal es el caso del *microdrive* hidráulico de la Figura 8 [10].

Por otra parte, usar motores eléctricos (AC, DC y de pasos) implica la implementación de un mecanismo de reducción y cojinetes exactos, donde el movimiento angular debe ser transformado a lineal. Con este tipo de métodos se pueden conseguir resoluciones de hasta $5\mu\text{m}$ en un rango de 100mm . Pero en miniatura, es difícil conseguir un sistema de estos que sea preciso, debido a que las tolerancias de fabricación producen juego mecánico. Además, motores eléctricos útiles para estas aplicaciones miden más de 1cm [16].

La Tabla 1 también muestra los métodos de posicionamiento basados en motores lineales de bobina de voz, los cuales ofrecen muy buenas resoluciones, pero la carrera de desplazamiento de estos sistemas comúnmente no llega a los 3mm.

Los métodos de posicionamiento que involucran actuadores basados en efectos piezoeléctricos y magnetostrictivos han presentado un buen equilibrio entre precisión y fuerza. En el caso de los piezoeléctricos, según las investigaciones de Kenji Uchino y Jayne R. Giniewicz presentan resoluciones finas para la posición, son de tamaño pequeño, tienen poco peso y tienen una estructura simple, entre otras ventajas (Tabla 3).

Una vez hecho este análisis general de los métodos de posicionamiento, se decidió que el diseño del sistema de posicionamiento debía basarse en un actuador piezoeléctrico. Por consiguiente, el diseño del mecanismo dependería de la estructura del actuador, de sus dimensiones y de la manera de transmitir el movimiento. Por ello, se dio a la tarea de buscar un actuador que fuera el adecuado para ser acoplado a un mecanismo y conseguir un dispositivo de microposicionamiento de poco volumen y poco peso.

Para obtener otro parámetro con el cual seleccionar un actuador, se realizó un experimento con el propósito de estimar la fuerza requerida para que la cánula atravesara las sustancias que cubren el cerebro (meninges) y penetrar los tejidos cerebrales. El experimento consistió en colocar diferentes masas sobre una aguja de jeringa (la cual simula la función de la cánula) hasta penetrar una gelatina que según neurofisiólogos de la Universidad Autónoma de Yucatán puede simular las propiedades de los tejidos del cerebro (Figura 27). La aguja tiene un diámetro de 0.8mm, una longitud de 30mm y con un peso de 0.3g. Luego de 5 experimentos se encontró que la masa promedio necesaria para lograr que la aguja penetre en la gelatina fue de 5.3g de ahí se estimó entonces que la fuerza de penetración es de 0.051[N].

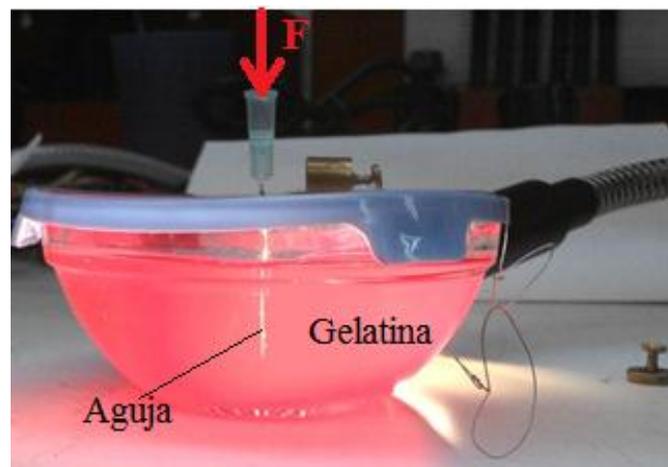
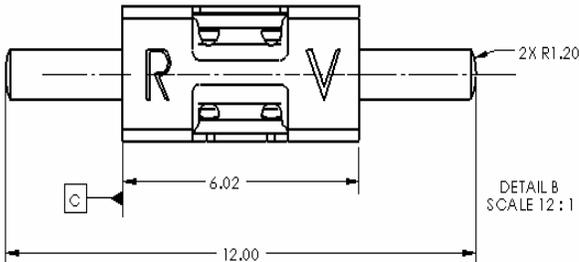
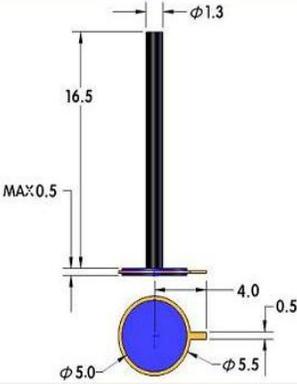


Figura 27. Experimento de la gelatina para estimar la fuerza de penetración. Diferentes masas fueron colocadas sobre la aguja hasta encontrar la masa mínima necesaria para penetrar la gelatina.

Para la búsqueda de actuadores se optó por considerar únicamente a los motores piezoeléctricos ultrasónicos, porque además de las características ya mencionadas producen fuerzas suficientes para esta aplicación a pesar de ser pequeños en tamaño, eso da oportunidad de suprimir etapas de reducción y transmisión. Otro punto a favor es que estos motores se auto-bloquean en ausencia de excitación debido a su mismo principio de funcionamiento, son silenciosos y no utilizan campo electromagnético para su funcionamiento.

De la búsqueda de motores ultrasónicos piezoeléctricos comercialmente disponibles, se eligieron dos como principales candidatos. El primero es el SQL-RV-1.8 SQUIGGLE de New Scale Technologies y el segundo de ellos es el TULA-50 de Piezoelectric Technology Co., Ltd que fue utilizado en [15]. En la Tabla 5 se presentan algunas de las características que tienen estos dos motores.

Tabla 5. Especificaciones de los motores piezoeléctricos SQL-RV-1.8 SQUIGGLE y TULA-50 [18], [19].

	SQL-RV-1.8 SQUIGGLE	TULA-50
		
Velocidad max [mm/s]	10	35
Fuerza de empuje [g.f]	50	45
Carrera [mm]	6	15
Frecuencia de excitación [kHz]	170	75
Peso [g]	0.16	0.18
Dimensiones generales o tamaño [mm]		
Resolución [μm]	0.5	1
Potencia de entrada [mW]	340	400
Temperatura de operación [°C]	-30 +80	-20 +50
Precio USD	90	80

Se piensa que ambos motores tienen las características y la capacidad de dar solución al problema, debido a que superan la fuerza requerida, la carrera de desplazamiento que tienen es mayor a los 3mm deseados, lo cual suprime la necesidad de incluir un amplificador de movimiento, la velocidad de avance para este caso no es crítica y sus dimensiones son aceptables.

El motor elegido para esta aplicación fue el SQL-RV-1.8 SQUIGGLE, debido a que presenta una estructura (carcasa) más sólida y manejable, su longitud es menor y su resolución es mayor. Dicho motor es un actuador ultrasónico de movimiento lineal, el cual consta de cuatro placas de material cerámico piezoeléctrico unidas a un tubo de metal roscado y un tornillo correspondiente, tal como se ve en la Figura 28.

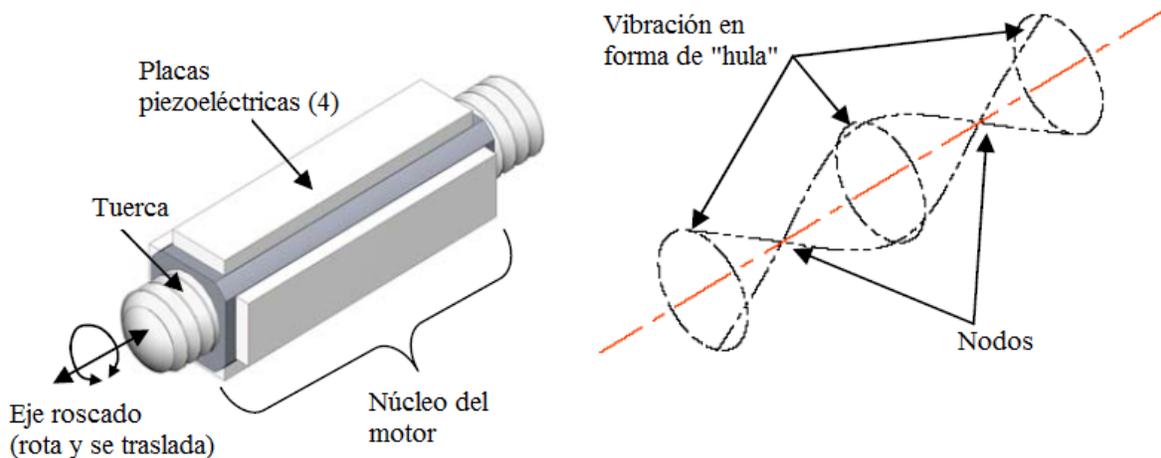


Figura 28. Estructura del motor piezoeléctrico SQL-RV-1.8 SQUIGGLE [18].

Una onda cuadrada de dos canales desfasados entre sí (onda viajera) es necesaria para flexionar las placas piezoeléctricas y crear el movimiento elíptico, generando así la rotación y la traslación del tornillo acoplado. La inversión del desfase de los canales invierte la dirección de la órbita y por lo tanto la dirección en la que se traslada el tornillo.

4.2.1.1 Diseño conceptual

Después de la selección del motor, se propusieron algunos diseños conceptuales de diferentes alternativas para transmitir el movimiento, todos ellos considerando que los avances o el movimiento longitudinal debían hacerse con la menor desviación posible y aprovechando únicamente la traslación del tornillo (o eje) del motor.

4.2.1.1.1 Propuesta 1

La primera propuesta de mecanismo se basa en el diseño mecánico propuesto por los fabricantes del motor seleccionado (ver Figura 29). A dicho diseño se agregó un rodamiento el cual se acopla con el eje del motor para desprejiciar el movimiento angular como se ve en la Figura 30. El motor (a) se encuentra sujeto a una base (b) por medio de un cinturón (c). El tornillo o eje del motor transmite el movimiento a una platina (d) a través del rodamiento (e) y dicha platina (d) se desplaza a lo largo de dos guías (g). La cánula que guía a los electrodos (f) se encuentra fija a la platina (d).

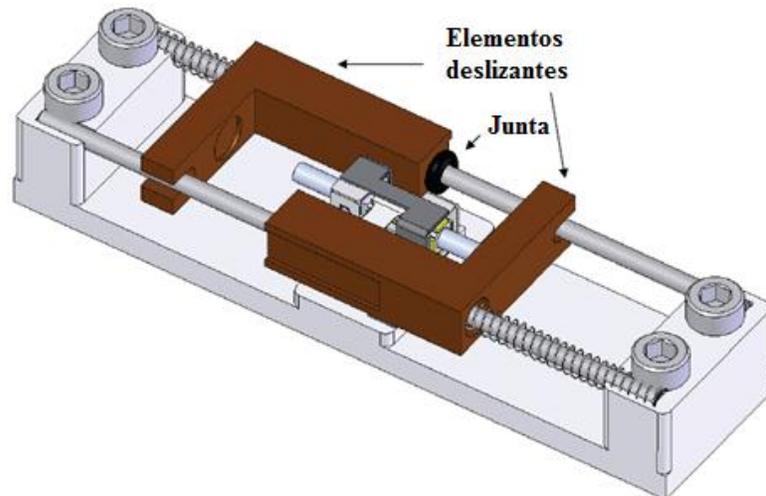


Figura 29. Diseño mecánico con el motor SQL-RV-1.8 SQUIGGLE propuesto por New Scale Technologies [18].

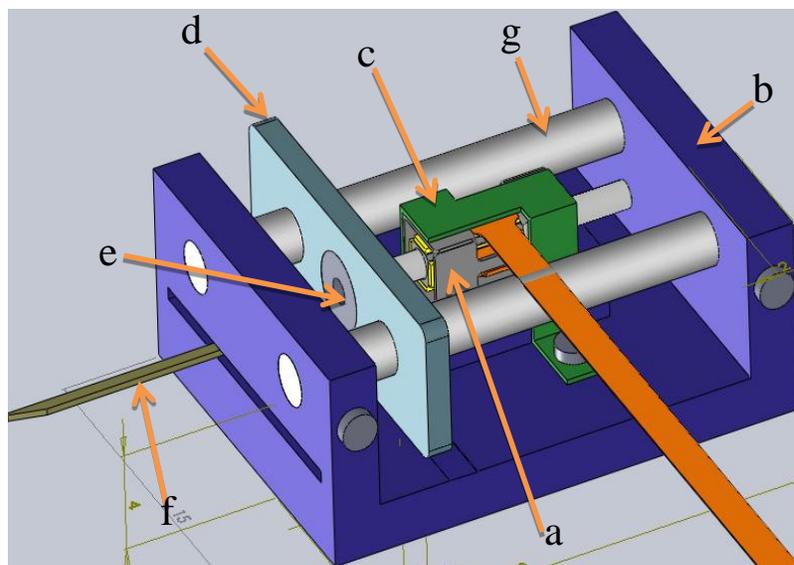


Figura 30. Propuesta 1 de diseño conceptual del mecanismo.

Con el fin de evaluar el funcionamiento, se fabricó un prototipo de esta propuesta. La mayoría de los componentes fueron construidos mediante manufactura aditiva. Para las barras guía se cortaron las secciones del mango de brocas de 1mm de diámetro. El rodamiento acoplado al eje del motor mide 1mm de diámetro interno y 3mm de diámetro externo. En la Figura 31 se observa la fabricación del mecanismo.

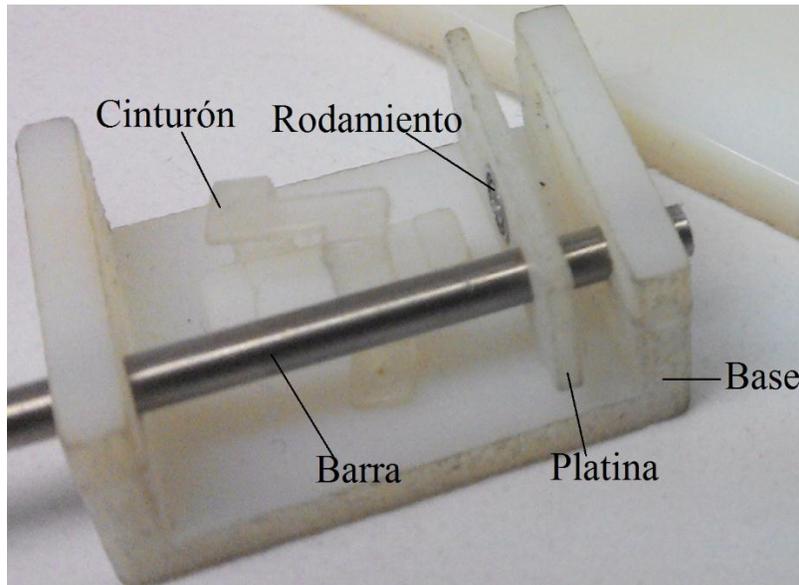


Figura 31. Fabricación de la propuesta 1 del mecanismo

Durante el proceso de desarrollo se observaron dificultades con la fabricación de este mecanismo, cuyas causas son principalmente las dimensiones requeridas (20mm x 15mm x 8mm). Además, no se encontraron juntas o rodamientos lineales con el tamaño requerido para el deslizamiento de la platina sobre las guías, por lo que la fricción y el tamaño del mecanismo provocan el mal funcionamiento y el atascamiento de la platina. Así mismo, sin accionar al motor, se identificó que la fuerza que proporciona el motor no es suficiente para mover el mecanismo, debido a los desvíos y al atascamiento de la platina. Manufacturar este concepto con máquinas CNC es complicado, ello se debe principalmente a la complejidad de sujetar la pequeña pieza sin producir deformaciones, las cuales a su vez producen errores de maquinado y por lo tanto no se puede conseguir la forma con las medidas deseadas.

4.2.1.1.2. Propuesta 2

En la Figura 32 se muestra la segunda propuesta del diseño del mecanismo. Esta vez, el diseño se basa en el ajuste mecánico de un buje y una flecha. Al igual que el diseño anterior, el eje del motor (1) transmite sólo el movimiento de traslación a un elemento llamado flecha (2) con la ayuda de un rodamiento (3). La flecha traslada la cánula deslizándose dentro de un

buje (4), el cual tiene la tarea de orientar y evitar el cabeceo de la flecha mientras avanza. Por medio de tornillos (5), el motor y el buje son fijados a una base (6) con tapa (7).

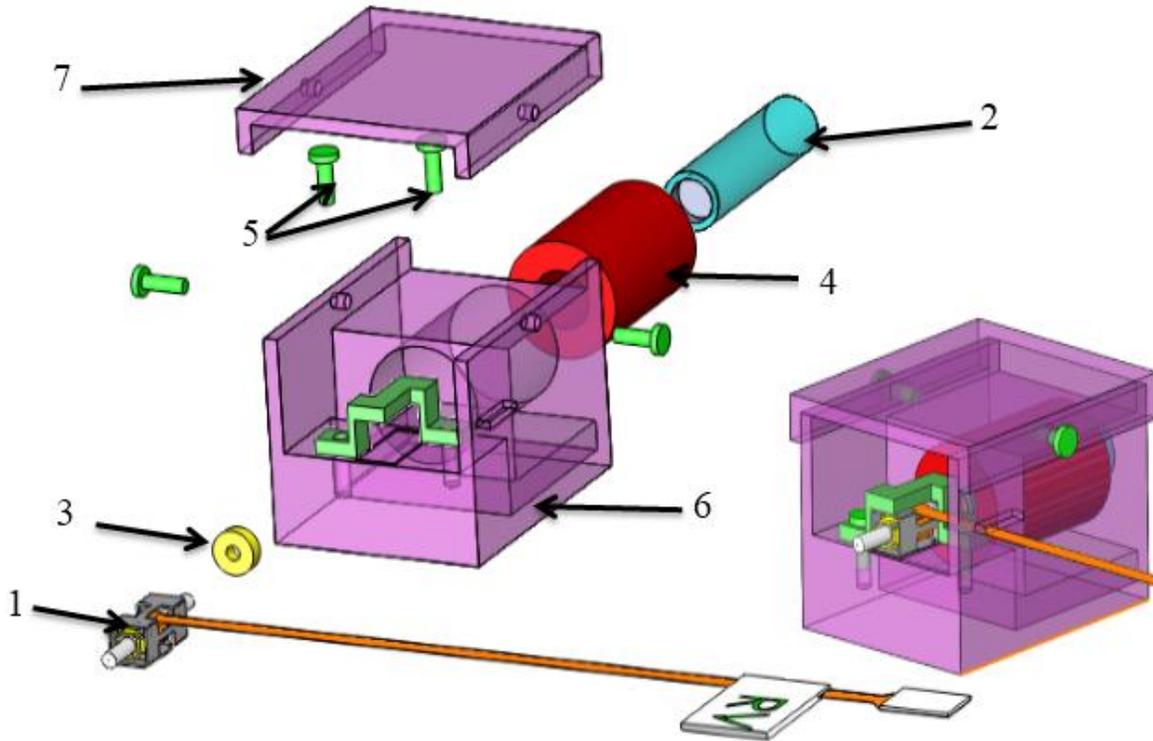


Figura 32. Segunda propuesta de diseño conceptual del mecanismo. Elementos que conforman el acoplamiento y vista isométrica del ensamble.

Se construyó también un prototipo de este concepto, con el objetivo de conocer y aprender de la función, el desempeño y la manufactura de cada una de las partes diseñadas y propuestas. En la Figura 33 se observa el prototipo fabricado y ensamblado.

Una vez ensamblado el sistema, el motor fue conectado a una tarjeta electrónica de desarrollo diseñada por el fabricante del motor (Figura 33), para accionar al sistema y hacer una evaluación. La parte crítica de este diseño es el ajuste mecánico entre la flecha y el buje. En la primera fabricación de este concepto el motor no pudo vencer la fricción causada por los errores de manufactura. Tras corregir las tolerancias de fabricación se logró poner en funcionamiento el prototipo sin embargo, los ajustes más holgados generaron desvíos laterales en el desplazamiento de flecha. Teniendo muy presentes las complicaciones y enseñanzas que deja este prototipo, se optó por hacer otro diseño y dar otra propuesta.

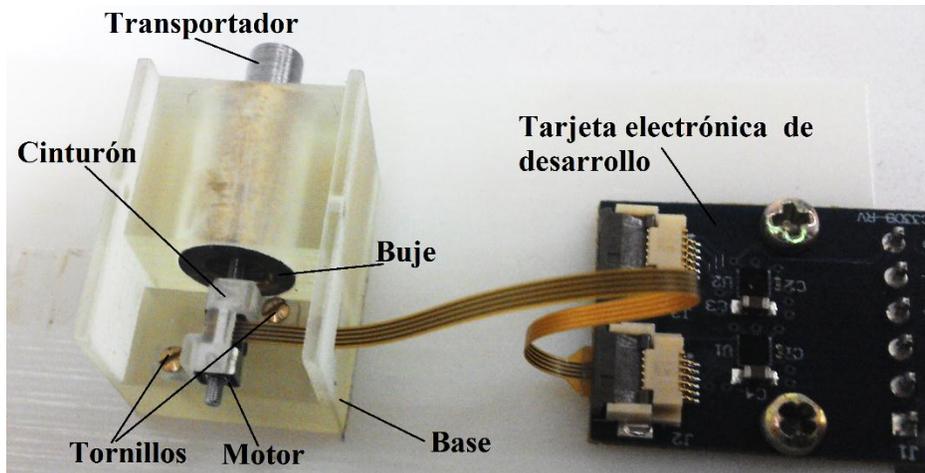


Figura 33. Segundo prototipo del mecanismo del *microdrive* y tarjeta electrónica de desarrollo MC-3300-RV de New Scale Technologies.

4.2.1.1.3. Propuesta 3

Un elemento que tienen en común los diseños anteriores es el rodamiento, el cual tiene dos funciones importantes; la primera es unir el eje del motor al elemento que se desliza transportando la cánula con los electrodos, la fijación se hace de manera mecánica por medio de un ajuste forzado, de tal forma que el elemento que transporta los electrodos (flecha) avanza y retrocede junto con el eje del motor. La segunda función que tiene el rodamiento, es transmitir sólo la fuerza de empuje que produce el motor.

Para esta nueva propuesta, el rodamiento fue eliminado y las funciones que él cumplía se realizan como sigue: primero, el elemento que se desliza transportando los electrodos es llamado pistón (1) en vez de flecha y se forma de dos diámetros diferentes como se ve en la Figura 34. En este diseño, el pistón se encuentra siempre en contacto con el eje del motor (2), gracias a la integración de un resorte (3), el cual se inserta concéntricamente con el pistón; cuando el eje del motor avanza, empuja al pistón y el resorte se comprime, cuando el eje del motor retrocede, el resorte regresa a su forma transmitiendo tensión al pistón y manteniendo siempre el contacto entre ellos. El movimiento angular no se aprovecha simplemente se disipa por fricción, debido a que el tornillo (eje del motor) gira sobre la superficie lisa del pistón. En la Figura 34 se observa una vista explosiva de la tercera propuesta de mecanismo.

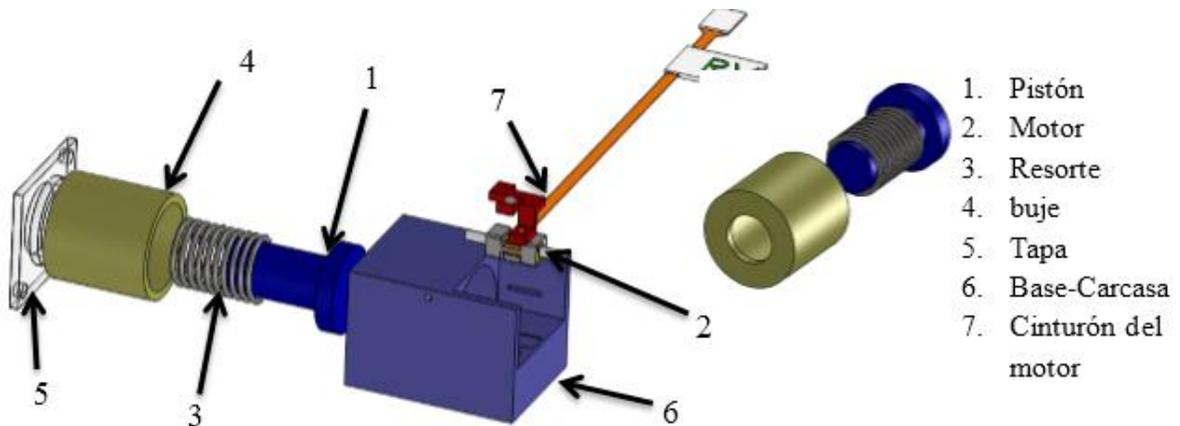


Figura 34. Vista explosiva de la tercera propuesta de diseño del mecanismo.

En este diseño el buje (4) tiene dos diámetros, el diámetro mayor forma una caja y el menor es pasado en el fondo de la caja como se ve en la figura anterior. En comparación con el buje de la propuesta 2, esta modificación disminuye el área de contacto entre buje y el elemento que se desliza (pistón), por lo tanto también la fricción entre ellos es menor. Además, el pistón ahora se desliza y se guía por los dos diámetros internos, los cuales orientan al pistón para producir un avance sin desvíos.

Para validar el funcionamiento del nuevo diseño, se fabricó un prototipo; el resorte se formó con alambre de acero inoxidable, el buje y el pistón se fabricaron con manufactura convencional (mediante procesos de conformación con eliminación de material) utilizando una fresadora CNC y para los demás componentes que no necesitaban tanta precisión, fueron construidos mediante manufactura aditiva.

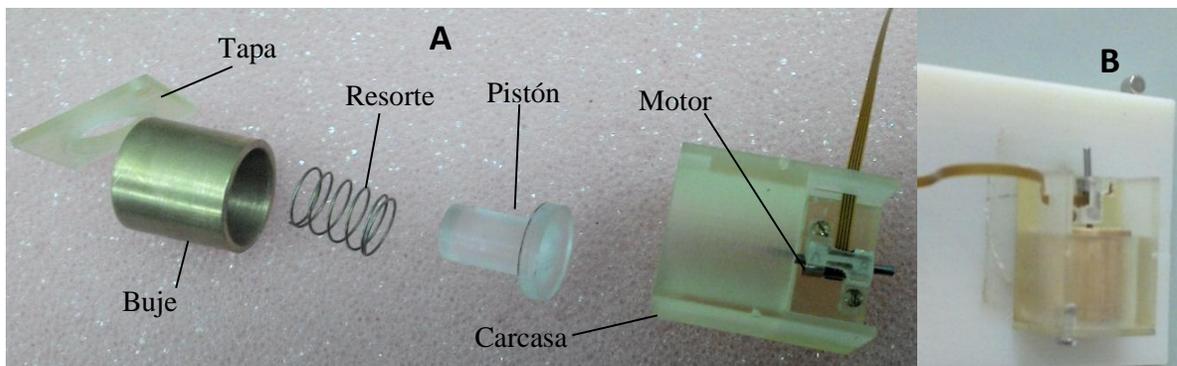


Figura 35. (A) Componentes y (B) ensamble del prototipo del tercer diseño del mecanismo.

Se acopló el motor al sistema y, a pesar de que la tensión del resorte fue calculada de manera experimental, se logró actuar al sistema consiguiendo un avance continuo de ida y vuelta con ligeros desvíos. Este prototipo pesa 7g y sus dimensiones generales son 14mmX14mmX15mm.

4.2.1.1.3.1 Rediseño de la propuesta 3 y mecanismo final

El diseño final del mecanismo se obtuvo a partir de un rediseño de la propuesta anterior. Primero se definió la manera de incorporar la cánula, la cual guiará a los electrodos. Después se definió que el método de sensado de la posición, se basaría en un sensor magneto-resistivo (en el siguiente capítulo se explica), por lo cual fue necesario incluir un imán permanente, que se moviera junto con el pistón. Finalmente fueron definidas las nuevas dimensiones para obtener un sistema más pequeño y de menor peso.

En la Figura 36 se puede ver una vista explosiva del diseño mecánico final del sistema de microposicionamiento, el cual opera como sigue; el sistema es accionado por el motor piezoeléctrico (a), el eje del motor gira y avanza empujando al pistón (b) y comprime al resorte (c). Por otra parte, cuando el eje del motor retrocede, el resorte se expande aplicando una fuerza de empuje al pistón, esto permite que el pistón también retroceda manteniendo contacto permanente con el eje del motor. La cánula (d) y el imán permanente (e) están unidos al pistón, por lo cual, el pistón desciende o asciende con los electrodos y el imán.

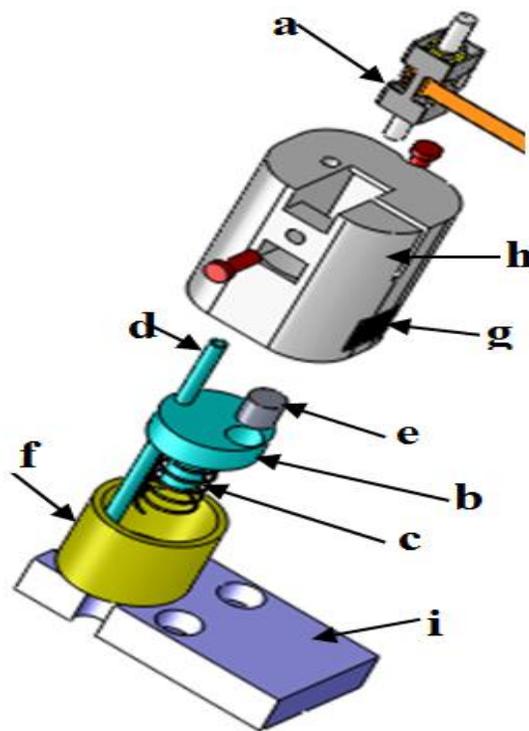


Figura 36. Vista explosiva del diseño final del acoplamiento mecánico del sistema de microposicionamiento.

El buje (f) es otro elemento importante, debido a que él es el encargado de orientar, guiar y evitar los desvíos del movimiento lineal, este elemento tiene la forma de una caja cilíndrica y en el fondo tiene dos barrenos por donde pasan el pistón y la cánula. El diámetro de la caja se ajusta al diámetro grande del pistón (Figura 37).

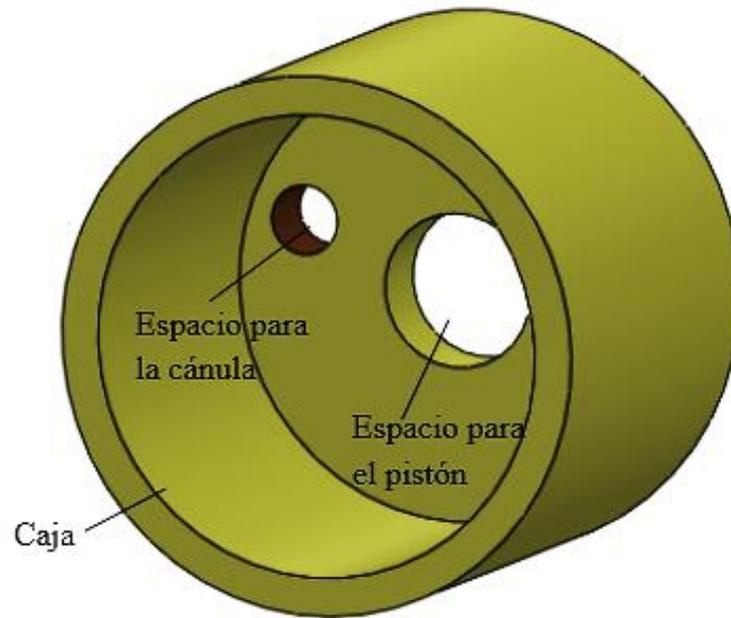


Figura 37. Ilustración del buje. En esta figura se muestra la forma y los diferentes diámetros con los que cuenta.

Por otra parte, una carcasa (h) cubre y da soporte a todo el mecanismo. Dicha carcasa tiene un espacio para poner y pegar el sensor de efecto Hall (g) que monitorea la posición del imán. Finalmente, una base/montura (i) (la cual se describe más adelante) fue diseñada para montar y fijar el *microdrive* a la cabeza de la rata.

4.2.1.1.3.1.1 Fabricación del mecanismo

El pistón, el buje y la montura fueron fabricados por medio de manufactura convencional (mediante procesos de conformación por eliminación de material). El pistón y la montura se hicieron en acrílico, mientras que el buje se realizó en latón para evitar la interacción de fuerzas magnéticas con el imán.

El resorte fue diseñado para este caso particular, siguiendo la relación que existe entre el cambio de carga y el cambio correspondiente en la flexión (ver ecuación (1)).

$$F_R = k \Delta x = k(L_f - L_m) \dots (1)$$

Donde:

F_R : Fuerza de tensión del resorte

k : Constante elástica

Δx : Cambio de flexión
 L_f : Longitud libre del resorte
 L_m : Longitud mínima (Flexión máxima)

Para estimar el rango de la carga (F_R) a la cual debe trabajar el resorte, se realizó un análisis de fuerzas en cual se involucran:

- La fuerza máxima que proporciona el motor (F_m): 0.5 [N]
- El peso del pistón (P): 0.2 [g]
- La fuerza estimada para penetrar el tejido cerebral de la rata, la cual se obtuvo en el experimento de la gelatina (F_p): 0.051 [N]
- Se consideró que la fricción en el ajuste mecánico entre el pistón y el buje es cero debido a que no se halló la forma de calcularla.

El motor debe ser capaz de comprimir el resorte, vencer la fuerza de penetración del cerebro y el peso del pistón, como se describe en la siguiente ecuación.

$$F_m > F_R + F_p + P \dots (2)$$

Sustituyendo valores de las fuerzas en la ecuación (2) se obtiene:

$$0.5 > F_R + 0.051 + (0.2 * 10^{-3} + 9.8) \dots (2)'$$

Reduciendo términos y aplicando las propiedades de las desigualdades se obtiene que:

$$F_R < 0.447 [N]$$

La expresión anterior indica que la tensión del resorte debe ser menor a 0.447[N] para que el motor sea capaz de mover el sistema. Por lo tanto se definió como $F_R = 0.4$ [N].

Ahora bien, sustituyendo la tensión del resorte $F_R = 0.4$ [N], la longitud libre del resorte $L_f = 5$ [mm] y la longitud del resorte comprimido como $L_m = 2.5$ [mm] en la ecuación (1), se obtiene:

$$0.4 = k(5 - 2.5) \rightarrow k = \frac{0.4}{2.5} = 0.16 [N/mm]$$

Por lo tanto, la constante elástica del resorte con la que se permite el movimiento de ida y el regreso del pistón es 0.16 [N/mm]. El material con el que fue fabricado es acero inoxidable, sus dimensiones generales se muestran en la Tabla 6. Por otra parte, la cánula de 15mm de longitud se obtuvo cortando una sección de aguja de una jeringa, la cual tiene un diámetro de 0.8mm. El elemento llamado carcasa, se fabricó de polipropileno con tecnología de manufactura aditiva, sus dimensiones generales se muestran también en la siguiente. En la Figura 38 se muestra una secuencia general del ensamble mecánico del *microdrive*.

Tabla 6. Componentes y características generales para la construcción de la propuesta final.

Componente	Descripción	No. Piezas	Dimensiones [mm]	Material	Manufactura
a	Motor	1	Ver Tabla 5	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)
b	Pistón	1	Largo: 6 Diámetro mayor: 6 Diámetro menor: 2 Longitud del diámetro menor: 4 Diámetro para cánula: 0.8 Diámetro para imán: 2	Acrílico	Convencional
c	Resorte	1	Longitud libre:5 Diámetro externo:2 Diámetro de alambre:0.15 6 espiras	Alambre de acero inoxidable	Convencional
d	Cánula	1	Longitud: 15 Diámetro externo del tubo: 0.8	Acero inoxidable	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)
e	Imán	1	Longitud: 2 Diámetro: 2	Acero imantado	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)
f	Buje	1	Largo : 6 Diámetro exterior:7 Profundidad de caja: 5 Diámetro de caja: 6 Diámetro por donde pasa el pistón: 2 Diámetro por donde entra la cánula: 0.9	Latón	Convencional
g	Sensor	1	SOT23-W 2 x 3 x 1	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)
h	Carcasa	1	Tamaño general: 7.6x10x13	Polipropileno	Aditiva
i	Montura	1	Tamaño general: 8x14x3	Acrílico	Convencional
j	Tornillo	6	Diámetro de cabeza: 2.3 Longitud total: 4 Diámetro:1.45 Longitud de cuerda:3	Acero inoxidable	Se adquirió comercialmente (Información no disponible)

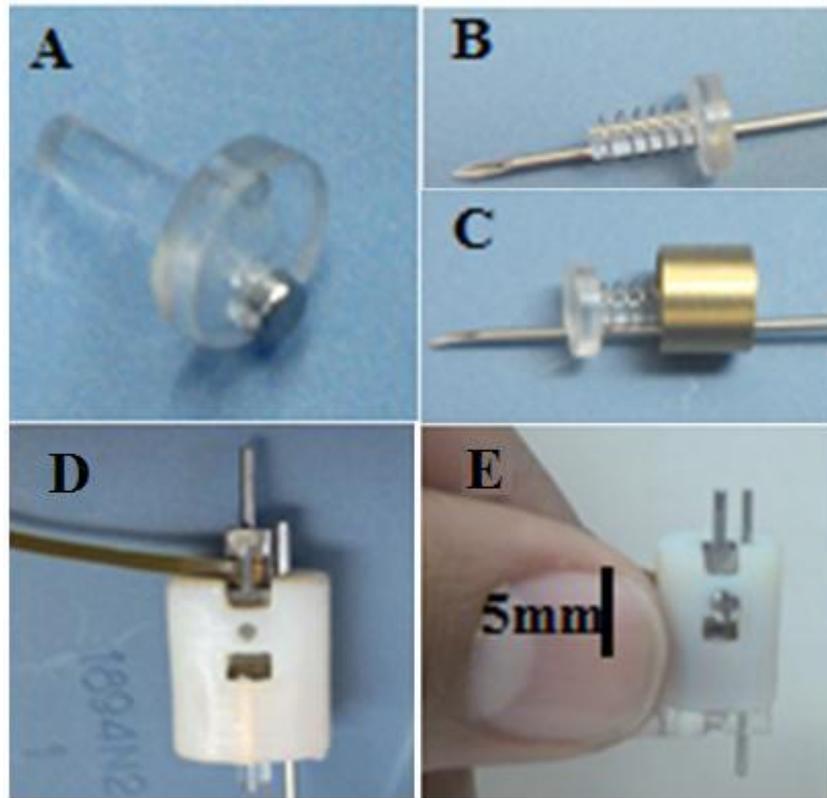


Figura 38. Fabricación y secuencia de ensamble mecánico del *microdrive*. (A) El imán es fijado al pistón. (B) El resorte se insertó en el pistón y la cánula se pegó con cianoacrilato 4 mm por encima de la longitud del pistón. (C) Los diámetros del pistón y la cánula se hicieron coincidentes con el buje. (D) los componentes de C y el motor piezoeléctrico se introdujeron en el elemento de alojamiento y soporte llamado carcasa. (E) Por último, la carcasa se fija a la montura por medio de dos tornillos.

4.2.2 Montura

El procedimiento de implantación de los dispositivos de microposicionamiento sobre la cabeza de la rata ha sido muy similar. Como se dijo en el capítulo 1 de este trabajo, primero el animal es anestesiado y puesto en un sistema estereotáxico, donde la cabeza de dicho animal es restringida y orientada con respecto a un sistema coordinado de tres dimensiones, esto permite al investigador perforar el cráneo para meter la cánula y los electrodos en la zona de interés [6]. Posteriormente, el dispositivo es montado sobre la cabeza de la rata introduciendo la cánula en la perforación. Se han utilizado tornillos para anclar el dispositivo al cráneo de la rata y en ocasiones se aplica cemento dental para cubrir la unión [15]. Este procedimiento es complicado, debido a que es necesario manipular todo el sistema mientras se monta, en caso de que no se tenga cuidado en el momento de la fijación, los electrodos serán introducidos en el lugar no deseado y el experimento se invalida.

Uno de los requerimientos de este nuevo sistema de microposicionamiento, el cual se enunció en el capítulo 4, es que el un dispositivo sea fácil de montar sobre la cabeza de una rata, específicamente en una rata de tamaño promedio y de la raza Wistar. Para cubrir este requerimiento se propuso el diseño de una montura que fuera pequeña y ligera, que brindara soporte y equilibrio al *microdrive* y que permitiera unir el *microdrive* al cráneo por medio de tornillos.

Para el diseño de la montura se tomó como referencia un punto sobre el cráneo, en el cual se desea introducir la cánula con los microelectrodos. Considerando el atlas estereotáxico del cual se habló en el apartado 1.2 de este trabajo; el punto de interés considerado se encuentra 2.5mm a la derecha de bregma sobre la sutura en la que convergen los huesos frontales y parietales (ver Figura 4). A partir de este punto, también se propusieron las distancias en las cuales se debe perforar para introducir tres tornillos y fijar la montura al cráneo, si se quisiera explorar otra zona estos parámetros tendrían que ser reajustados para fabricar otra montura. Las distancias consideradas en este caso se pueden ver en la Figura 40 .

Para dimensionar la montura, fue escaneado un cráneo real de rata con ayuda de un escáner 3D (HandySCAN, Creaform). El modelo virtual del cráneo obtenido de esta digitalización dio oportunidad de dimensionar la montura y proponer su forma (Figura 38).

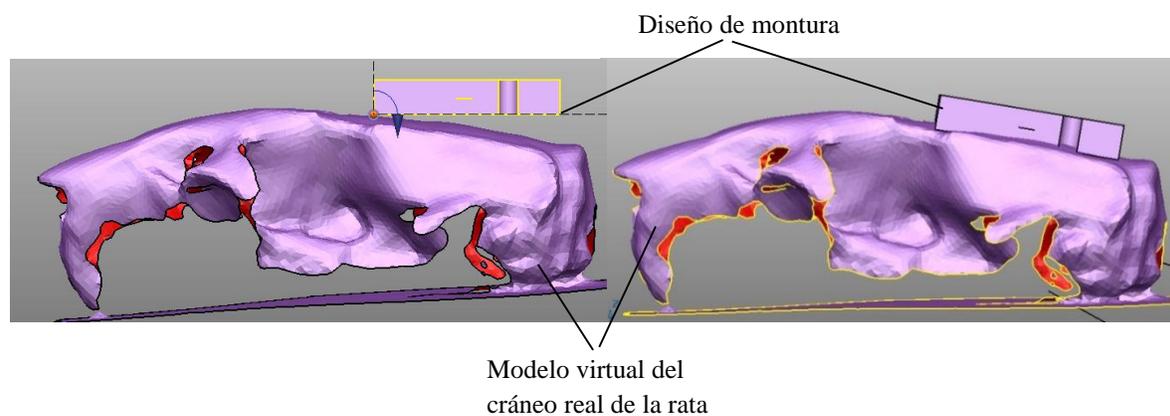


Figura 39. Digitalización del cráneo de una rata y el diseño de la forma de la montura para el *microdrive*.

El diseño de la montura se puede observar en la Figura 40. La montura contiene tres espacios (1, 2, 3) para introducir tornillos y hacer la fijación al cráneo de la rata, un barreno pasado (4) por donde descende la cánula, una caja que funciona como guía hembra para ensamblarse con la carcasa del *microdrive*, una cavidad por donde entra y sale parte del pistón (6) y dos barrenos no pasados con cuerda para fijar mecánicamente el *microdrive* a la montura.

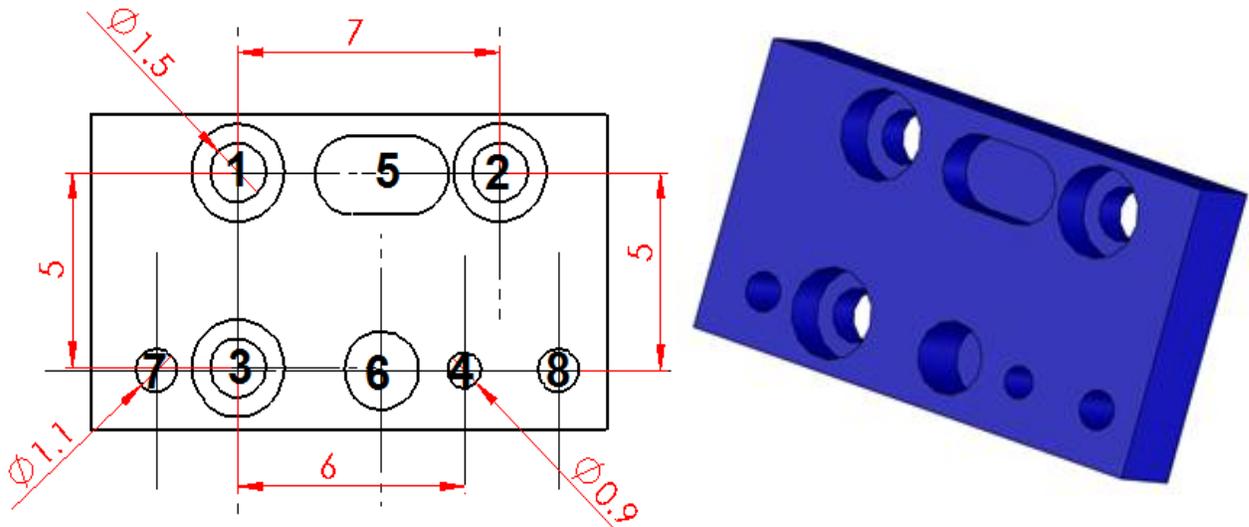


Figura 40. Diseño de la montura para fijar el *microdrive* a la cabeza de la rata y algunas de sus dimensiones críticas.

En la Figura 41(A) se observa el punto en el cual debe ser perforado el cráneo para meter la cánula y en la Figura 41(B) se simula el montaje del *microdrive* con la montura. Las dimensiones generales de la montura se pueden ver en la Tabla 6.

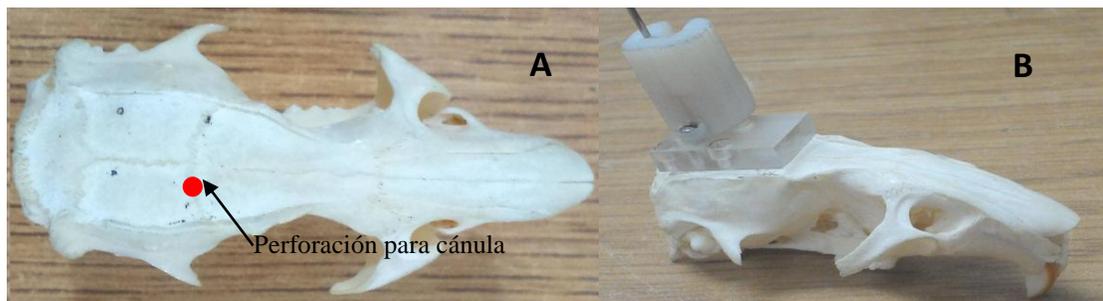


Figura 41. (A) Ubicación del punto sobre el cráneo de la rata, donde entrará la cánula y en el cual se basa el diseño de la montura. (B) Ensayo del montaje del *microdrive* sobre el cráneo de la rata.

4.2.3 Sistema de control de movimiento de *Microdrive*

En la Figura 42 se presenta un diagrama esquemático de un sistema completo para registrar actividad neuronal en ratas. En este esquema se observa que algunos cables son conectados al *microdrive*, los cuales son necesarios para extraer las señales obtenidas por los electrodos y para controlar al *microdrive*. Sin embargo, el registro de actividad neuronal se

hace con ratas moviéndose libremente, por lo cual se requiere la mínima cantidad de cables para evitar complicaciones durante el experimento. Si la electrónica de control forma parte del mismo *microdrive*, existe la posibilidad de minimizar la cantidad de cables.

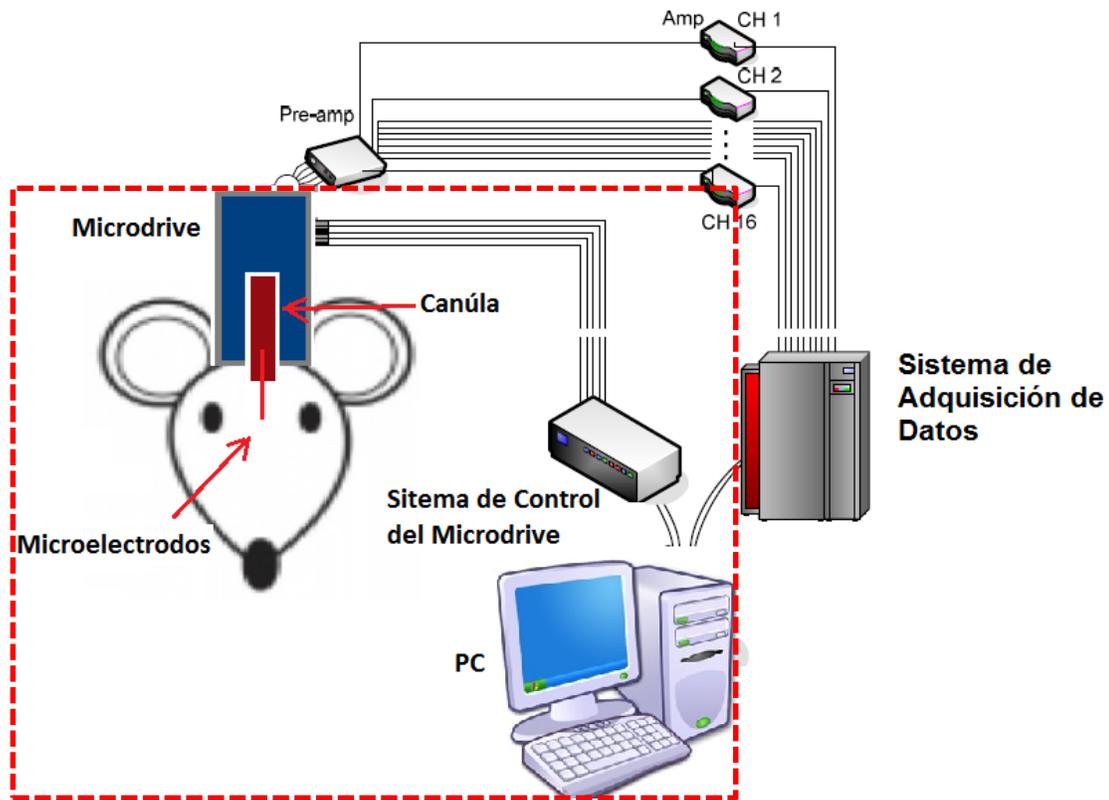


Figura 42. Diagrama esquemático de un sistema completo de registro de actividad neuronal [15]. El recuadro de línea punteada delimita el sistema de microposicionamiento y el resto corresponde al sistema de adquisición de las señales eléctricas de las neuronas.

Para controlar el motor y evaluar el funcionamiento de los mecanismos, en un principio se utilizó una tarjeta electrónica de desarrollo producida por los mismos fabricantes del motor (MC-3300-RV de New Scale Technologies). El funcionamiento de esta tarjeta se basa en un controlador de motores piezoeléctricos, el cual es abordado por comunicación I²C (NSD-2101, austriamicrosystems). Esta tarjeta es capaz de controlar dos motores, se alimenta con voltajes lógicos y tiene los pines ideales para conectarse a una protoboard (Figura 43). Sin embargo, en este caso la tarjeta es relativamente grande para ser pegada al *microdrive* y formar parte de él.

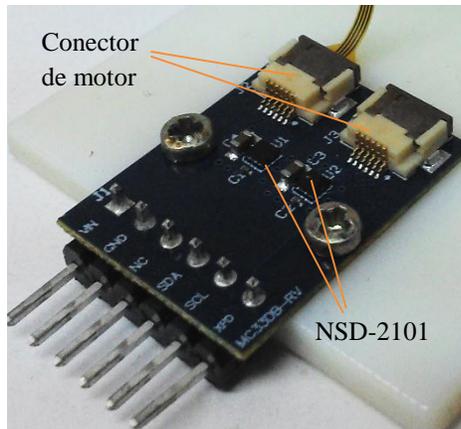


Figura 43. Tarjeta electrónica de desarrollo MC-3300-RV de New Scale Technologies

Por otra parte, uno de los requerimientos de este sistema de microposicionamiento de electrodos es que el posicionamiento sea de forma automática y con resolución micrométrica. De modo que es necesario un sistema de control con realimentación de la posición. Entonces, considerando el principio de funcionamiento del motor piezoeléctrico, los requerimientos y necesidades, se definieron las siguientes funciones básicas para diseñar un nuevo sistema de control:

- Generación de pulsos de voltaje: Para crear las microdeformaciones en los materiales piezoeléctricos del motor y generar el movimiento
- Detección de la señal del sensor y análisis: Para obtener la señal del sensor y relacionarla con el valor de la posición
- Control con realimentación de la posición: Para comparar la posición actual con la deseada y decidir si es necesario el avance.
- La comunicación con PC: Para controlar y monitorear al sistema en un entorno visual

En la Figura 44 se muestra un diagrama de flujo donde se observa la iteración de las funciones básicas definidas para el diseño del sistema de control.

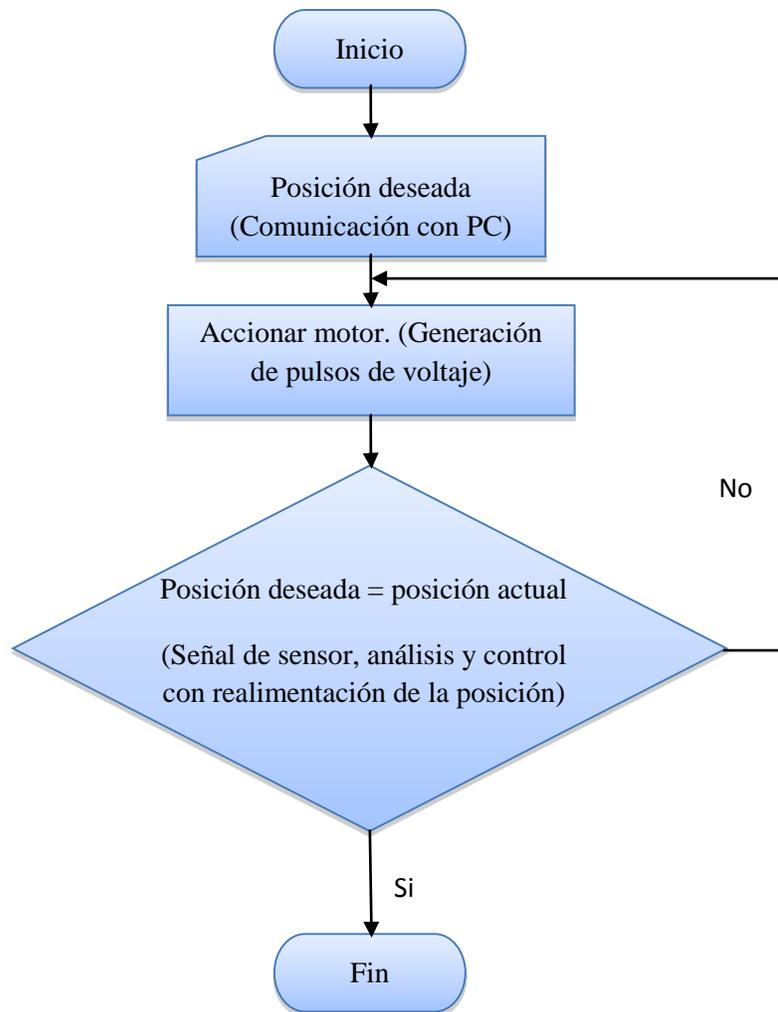


Figura 44. Diagrama de flujo del sistema de control del *microdrive*.

4.2.3.1 Controlador de motor piezoeléctrico NSD-2101 (Generación de pulsos).

En el capítulo 3 de este trabajo se dijo que un motor piezoeléctrico genera un movimiento mecánico macroscópico a través de la amplificación y repetición de microdeformaciones de materiales piezoeléctricos activos. Para que estos motores funcionen es necesario crear un movimiento elíptico en el punto de contacto entre el elemento deslizador y estator, como se ilustra en la Figura 18 y Figura 28. Una manera de generar el movimiento elíptico es excitando al motor por medio de la superposición de dos ondas estacionarias, las cuales deben tener una frecuencia igual a la de resonancia de los piezoeléctricos y estar defasadas entre si 90 grados o -90 para cambiar el sentido de deslizamiento.

Para generar las ondas y controlar al motor se eligió el mismo controlador implementado en la tarjeta de desarrollo MC-3300-RV. El NSD-2101 es un controlador de motores piezoeléctricos recomendado por los mismos fabricantes del motor SQL-RV-1.8 SQUIGGLE. Este circuito integrado es capaz de controlar un motor piezoeléctrico a partir de una fuente de alimentación de 2.3 - 5.5 VCC (Voltaje de Corriente Continua) y de información recibida mediante una interfaz I²C.

Para generar los dos pares de ondas cuadradas (ver Figura 45), es necesario escribir valores específicos en registros de memoria temporal del NSD-2101, algunos de estos valores corresponden; al defasamiento, al ciclo de trabajo, a la amplitud de las señales y a la frecuencia, con lo cual se puede controlar sentido de movimiento, la potencia y la velocidad del motor respectivamente. En la Tabla 7 se muestran todos los registros con los cuales cuenta el controlador.

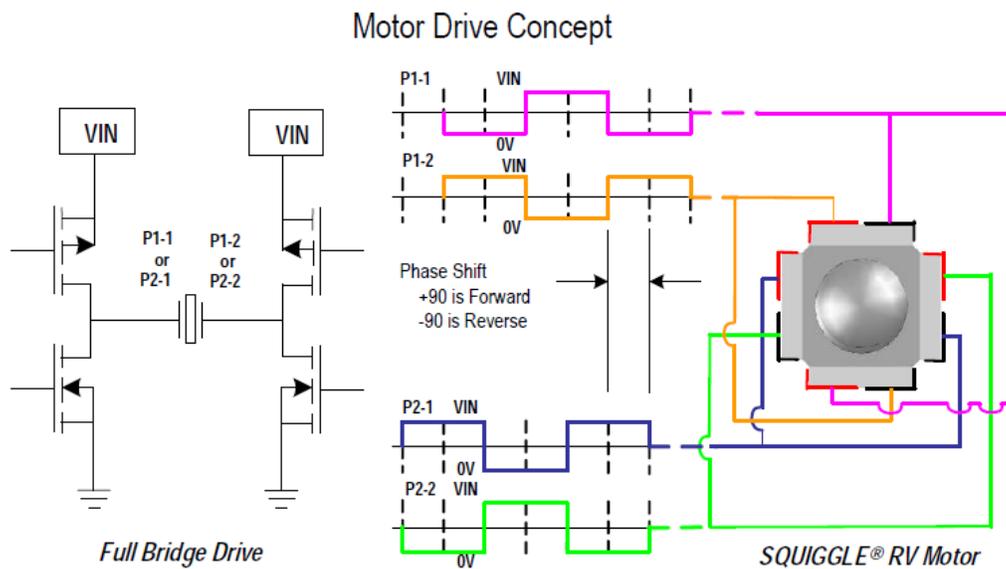


Figura 45. Concepto del control del motor SQL-RV-1.8 con el driver NSD-2101 [22].

Tabla 7. Lista de registros del NSD-210 los cuales pueden ser abordados a través de la interfaz I²C [22].

Descripción	Dirección	Byte de datos								Notas
		MSB				LSB				
Registro de control	00h		PS[1]	PS[0]		CN[1]	CN[0]	P1	P2	
Contador de periodo	01h	X	X	X	X	X	X	X	X	
Contador de pulsos (bits más significativos)	02h	P	D	DS[1]	DS[0]		X	X	X	P: Contador de periodo (MSB) D: Bit de dirección DS: Bits de tiempo muerto “00”=2, “10”=6 y “11”=8 ciclos de reloj
Contador de pulsos (bits menos significativos)	03h	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ancho de pulso	04h	X	X	X	X	X	X	X	X	
Desplazamiento de fase	05h	X	X	X	X	X	X	X	X	
Offset del periodo	06h	IDL	HB	HYB	DT		X	X	X	IDL: Establece el tiempo de espera HB: Habilita medio puente de ondas HYB: Habilita la velocidad híbrida DT: Habilita la opción de modificar el tiempo muerto
Velocidad híbrida	07h	X	X	X	X	X	X	X	X	Acepta valores de 0 a 127 para utilizar uno o los dos pares de onda respectivamente
Registro reservado	10h	X	X	X	X	X	X	X	X	Registro no accesible en operación normal

El NSD-2101 trabaja como esclavo para el bus I²C y su dirección es A8h. La interfaz I²C es compatible con 8 bits de datos y un bit de reconocimiento o de respuesta para formar un total de 9 bits. Por lo tanto, para establecer comunicación con el NSD-2101, un microcontrolador primero debe activar el bus enviando una condición de inicio y después los bytes de escritura. El primer byte de datos transmitido debe corresponder a la dirección del esclavo (A8h), el segundo debe ser el número de registro en el cual se desea escribir y los siguientes bytes son los valores que se escribirán en el registro especificado. Si se siguen transmitiendo datos estos serán escritos en los registros subsecuentes. Así por ejemplo, si los

datos: A80277FF se envían a través del bus I²C después de una condición de inicio; se estaría escribiendo en los registros 02 y 03 del NSD-2101 los valores de 77h y FFh respectivamente.

Para conseguir el movimiento del motor es necesario definir la frecuencia de las ondas o los pulsos, la cual debe ser lo más parecida a la frecuencia de resonancia del motor, en este caso 170 kHz. Para obtener dicha frecuencia se debe escribir un valor específico en el registro 01h (ver Tabla 7), el cual es llamado contador de periodo, dicho valor se puede definir a partir de la siguiente ecuación dada por la hoja de especificaciones del controlador:

$$fD = \frac{25MHz}{\text{contador de periodo}}$$

Dónde 25MHz es el reloj interno del NSD-2101 y fD es la frecuencia de los pulsos de salida. De modo que, para obtener una frecuencia cercana a 170kHz, el contador de periodo debe valer 145, lo que resulta una fD=172.4 kHz. El número decimal 145 equivale al número binario 1001 0001 y este dato es el que debe ser escrito en el registro.

Además de la frecuencia, es indispensable modificar el valor de los registros 02h y 03h los cuales corresponden a la parte más significativa y a la menos significativa del registro llamado contador de pulsos. Cuando un valor distinto de cero es escrito en estos dos registros, inicia la generación de los pulsos con la frecuencia establecida en el registro 01h y como consecuencia se genera el movimiento en el motor. Por cada pulso generado, el número escrito en los registros disminuye en uno hasta que el contador llega a cero y el motor se detiene. El contador de pulsos se limita a 2047 (11 bits), de modo que la duración máxima del movimiento es el periodo x 2047. Si el período es de 5.8 microsegundos (frecuencia de 172.4 kHz), entonces la duración sería aproximadamente 11.8 ms. Por lo tanto, para producir un movimiento continuo, el contador de pulsos debe ser reescrito por el maestro (microcontrolador) antes de que el contador de pulsos expire. Se debe considerar que el motor se basa en un elemento de fricción, lo cual implica que la cantidad de movimiento depende directamente de la amplitud de los pulsos, la frecuencia y de la carga en el motor, esto significa que el mínimo número de pulsos para generar movimiento varía con la carga, lo que significa que a mayor carga más pulsos son necesarios. Los registros restantes pueden ser modificados para obtener un funcionamiento más eficiente.

4.2.3.2 Sistema de sensado (Detección de la señal del sensor y análisis)

Para conseguir avances requeridos de 10 μm en un rango de 3mm y conseguir un posicionamiento automático es necesario un sensor, el cual debe encargarse de obtener información relacionada con la posición.

Por otro lado, en el capítulo 3 se dijo que el motor SQL-RV-1.8 se basa en elementos de fricción (tornillo y tuerca) y el movimiento que genera surge de la amplificación y repetición de pequeñas deformaciones en materiales piezoeléctricos. Al mismo tiempo, la cantidad de movimiento que produce el motor también depende de la carga a la cual esté sometido. Por estas razones se sabe que el movimiento o desplazamiento longitudinal que presenta el tornillo del motor no es lineal, es decir; aunque el controlador del motor piezoeléctrico (NSD-2101) envíe cada vez la misma cantidad de pulsos, los avances del tornillo no son iguales, tal como se ve en la Figura 46. Este comportamiento no lineal del motor en lazo abierto es otra razón por la cual es necesario un sensor de posición.

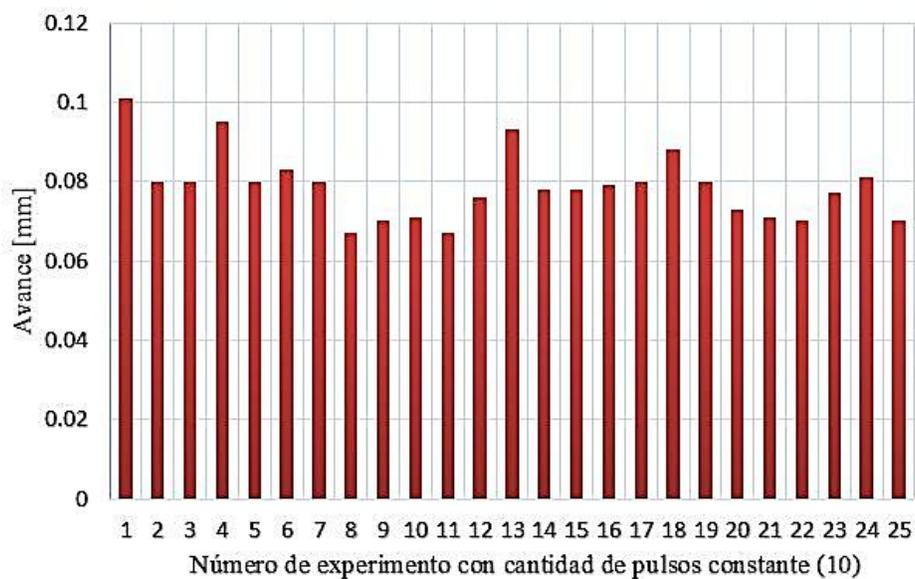


Figura 46. Funcionamiento del motor SQL-RV-1.8 en lazo abierto. Gráfica que muestra la cantidad de movimiento (avance) en diferentes iteraciones, todas con el mismo número de pulsos alimentados por el NSD-2101.

4.2.3.2.1 Selección del sensor

Considerando los métodos de medición de la posición descritos en el capítulo 3, se hizo un análisis con el objetivo de identificar el método más adecuados para esta aplicación, las características críticas consideradas en este caso fueron el tamaño, el peso y la resolución los sensores. De este análisis se eliminaron automáticamente los métodos ópticos, debido a que su principio de funcionamiento requiere de espacios geométricos relativamente más grandes, lo que hace no aptos para la implementación en un dispositivo con las características de un *microdrive*.

Por otro lado, considerando los métodos eléctricos; los métodos de inducción electromagnética comúnmente son utilizados para medir desplazamientos, sin embargo ellos necesitan de un extenso acondicionamiento de señal para obtener resoluciones de $1\mu\text{m}$ o menores [16], esto resultaría un aumento de volumen y de peso en la electrónica y por lo tanto en el *microdrive*. Los sensores capacitivos disponen de muchas configuraciones de montaje, pero su respuesta es muy sensible a factores como la humedad; se sabe de antemano que el sistema *microdrive* tendrá aplicación en experimentos con animales vivos, por lo tanto la humedad de los tejidos naturales de la rata o del medio donde se realizan tales experimentos pueden inducir errores en la medición.

Los potenciómetros de no contacto se basan en efectos magneto resistivos y de efecto Hall, son de tamaño pequeño y tienen la gran ventaja de leer la posición sin tener el contacto mecánico entre los elementos móviles, esto da lugar a un control más duradero debido a que no hay elementos que se puedan desgastar puesto que el enfoque consiste en detectar a un imán móvil. Por lo tanto, se definió que el sistema de sensado de la posición debía basarse en sensor magnético. De entre varios sensores disponibles comercialmente se eligió el A1324 Allegro, MicroSystems, Inc. debido a que su tamaño ($2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 1\text{mm}$) y funcionamiento son considerados adecuados para esta aplicación.

Este sensor se basa en el efecto Hall para leer desplazamientos lineales, posición angular y corriente; dicho sensor proporciona un voltaje de salida que es proporcional al campo magnético aplicado. Sin embargo, para incorporar el sensor al sistema fue necesario hacer una caracterización, por lo cual fue necesario diseñar una tarjeta de circuito impreso (PCB) para manipular al circuito integrado (C.I.).

Para hacer la caracterización se propuso un experimento, el cual consistió en obtener la respuesta que proporciona el sensor con diferentes imanes y a diferentes distancias. Este experimento se realizó con el objetivo de identificar la distancia entre el sensor y el imán que proporciona la mayor resolución y la mayor amplitud del voltaje de respuesta. La PCB con el sensor A1324 fue fijada a un elemento empotrado sobre la estructura de un proyector de perfiles (NIKON Profile), ubicado en el laboratorio de metrología del CCADET (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico), luego el imán fue colocado e inmovilizado a un costado de la platina del proyector como se ve en la Figura 47. Los desplazamientos del imán se generaron al mover dicha platina, al mismo tiempo se adquirió la señal del sensor por medio del ADC (convertidor analógico a digital de 10 bits) de una tarjeta arduino. En la Tabla 8 se observan los datos obtenidos de este experimento y en la Figura 48 los parámetros considerados.



Figura 47. Experimento para caracterizar el sensor A1324 montado en un proyector de perfiles (NIKON Profile).

Tabla 8. Resultados de experimentos para la caracterización del A1324.

Dimensiones del imán [mm]	D [mm]	d [mm]	Max	Min	Resolución [μm]
Diámetro: 3	1	1.5	1001	0	1.5
	2	2.5	780	196	4
Longitud: 2	3	3	553	418	20
	1.5	2.5	750	229	4.8
Diámetro: 2	3	4.5	569	385	24
	2	5.5	667	281	14
Longitud: 6	1.5	6	807	120	8.7
	1	6	938	0	6.3
Diámetro: 2	1	2	863	123	2.7
	1.5	2.25	741	228	4.3
Longitud: 2	2	2.75	575	380	14
	3	3	535	425	27

Donde:

- D: distancia entre el sensor y el imán.
- d: carrera o rango de medición del sensor.
- Max: valor máximo leído por el ADC del microcontrolador.
- Min: valor mínimo leído por el ADC del microcontrolador.
- Resolución = $d / (\text{Max} - \text{Min})$

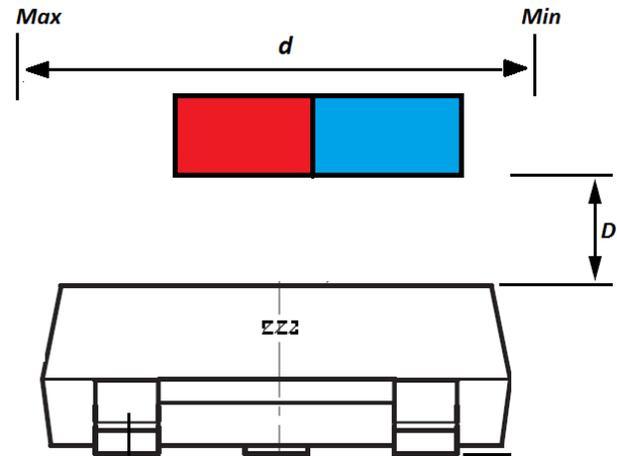


Figura 48. Parámetros considerados en el experimento para caracterizar el sensor A1324

En la Tabla 8 se puede observar un renglón sombreado que ilustra que, si el sensor de desplazamiento se implementa con un imán cilíndrico de 2mm de diámetro y 2 mm de largo, a una distancia de 1.5mm del sensor de efecto Hall, es posible medir desplazamientos en un rango 2.25mm con una resolución teórica de 4.3 μm . En la Figura 49 se ve la forma de onda de la señal proporcionada por el sensor para esta configuración.

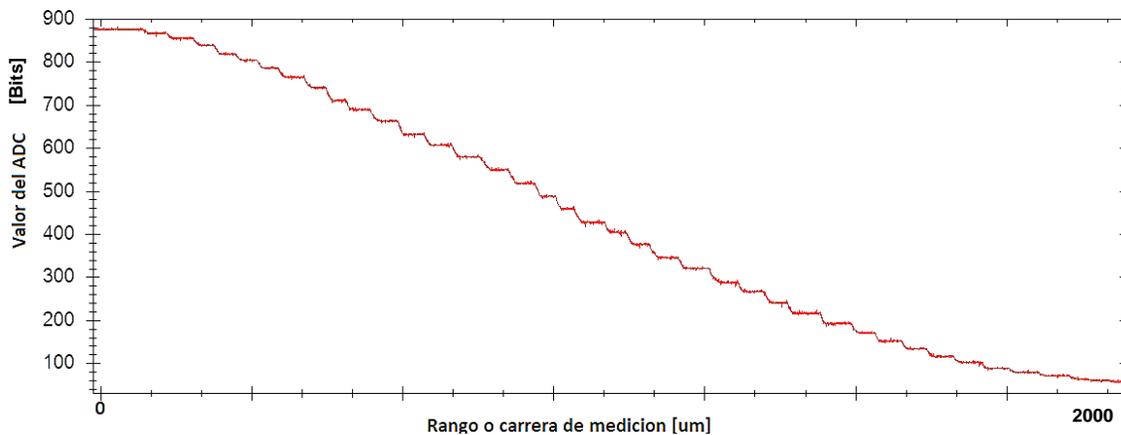


Figura 49. Señal proporcionada por el sensor A1324 leída con el ADC-10bits para una carrea de desplazamiento de 2064 μm .

El parámetro de la distancia entre el sensor y el imán (1.5mm) obtenida de este análisis fue considerado para diseñar el espacio del imán en pistón y para diseñar el espacio del sensor en carcasa del mecanismo. Una vez que el sistema mecánico fue construido, el sensor se pegó y se ajustó a la distancia definida. Sin embargo, para aumentar la resolución teórica de los avances, el convertidor analógico-digital (ADC de 10 bits) fue reemplazado por el convertidor ADS1000 de 12 bits (de Texas Instruments, Inc, U.S.). Este circuito integrado también es compatible con el protocolo I²C, por lo cual ahora la señal que proporciona el

A1324 puede ser obtenida por un microcontrolador a través del bus I²C después de ser convertida a digital.

Para conseguir una medida real de la posición a través del sensor, el imán y el ADS1000 se desarrolló el esquema de calibración que a continuación se explica.

4.2.3.2.2 Calibración del sensor

El banco de pruebas para la calibración del sensor se compuso básicamente por una fuente de voltaje regulado, el proyector de perfiles (NIKON Profile) y su sistema electrónico de medición de avances. También fue necesario el uso de un microcontrolador PIC para manejar la interfaz I²C y controlar al *microdrive* desde una PC.

Para la calibración del sensor de desplazamiento, se siguieron los siguientes pasos:

1. El *microdrive* completamente ensamblado fue pegado con cinta adhesiva en el centro de la platina del proyector de perfiles.
2. Se verificó que el sistema electrónico de medición de avances de la platina funcionara adecuadamente.
3. La electrónica de control del motor y el sistema de sensado se alimentó con una tensión de 5V.
4. Se conectó y se verificó que la comunicación PC-PIC funcionara adecuadamente.
5. Se hicieron girar las manivelas de los tres ejes de la platina para hacer el enfoque de la cánula del *microdrive* y proyectar esto en la pantalla del proyector de perfiles.
6. Se giró la pantalla de proyección para orientar las líneas de referencia con las que cuenta la pantalla con respecto a la proyección del perfil de la cánula (ver Figura 50). En este caso se hizo coincidir la línea de referencia horizontal con el extremo final de la cánula y la vertical se orientó paralela a la longitud de la cánula.
7. Con ayuda de la PC se puso en marcha al *microdrive* generando un número al azar de pulsos.
8. Se registró el valor que proporciona el ADC (ADS1000).
9. Se aseguró que el display del sistema electrónico de medición de avances del proyector de perfiles marcara cero.
10. Se hizo girar una de las manivelas para conseguir nuevamente coincidencia de la línea de referencia horizontal con el extremo de la cánula.

11. Se registró el número que marcado en el display electrónico, el cual corresponde a la medida del desplazamiento que hizo la cánula después de poner en marcha el *microdrive*.
12. Se realizaron 30 mediciones a lo largo de la carrera del *microdrive*.
13. Se representaron gráficamente los valores del ADC con respecto al desplazamiento registrado por el proyector de perfiles (Figura 52).
14. Se calculó la curva de ajuste para buscar el polinomio que represente la curva generada por el sensor (ver anexo A.1).

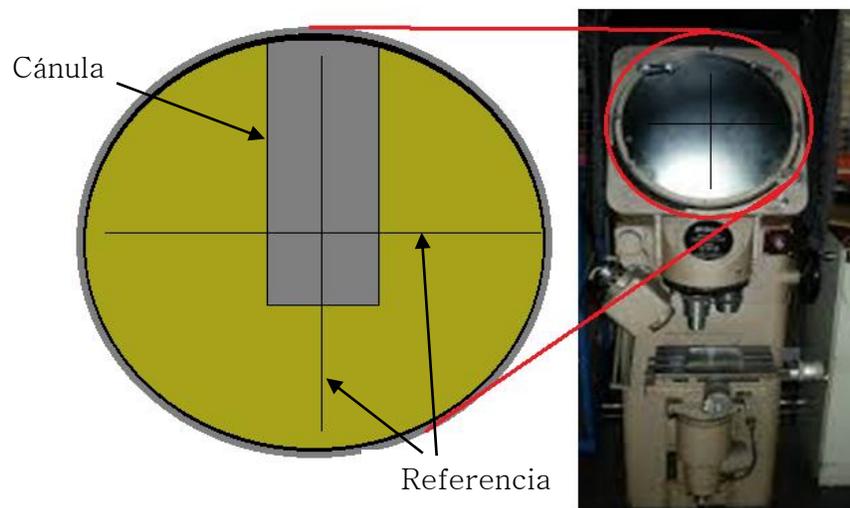


Figura 50. Proyección del perfil de la cánula y orientación del sistema de referencia para realizar las mediciones de los desplazamientos.

Resultados de la calibración.

Con los datos obtenidos en el proceso de calibración se generó la forma de onda de la señal del sensor con respecto a la posición registrada en el proyector de perfiles (Figura 51), así como el punto máximo y el punto mínimo, los cuales corresponden al inicio y al fin de la carrera de desplazamiento ($0\mu\text{m}$ y $2046\mu\text{m}$ respectivamente).

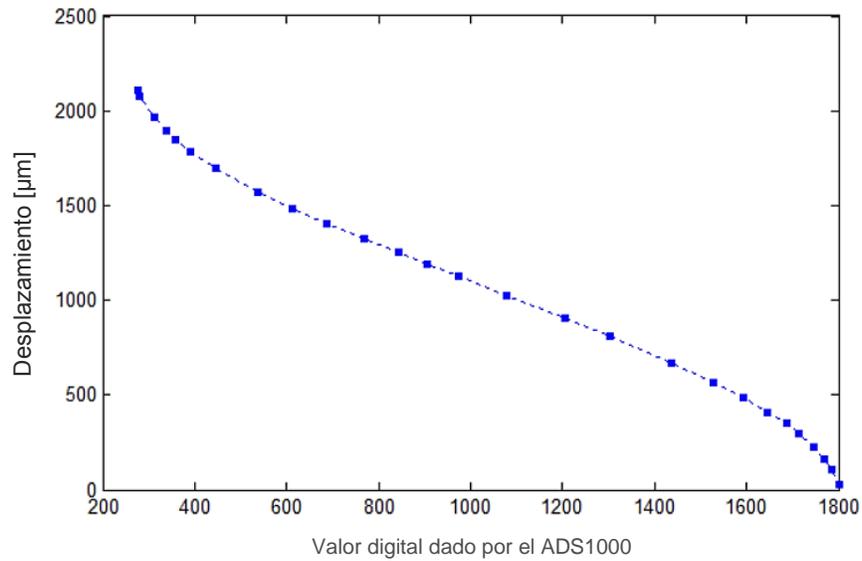


Figura 51. Forma de onda obtenida a partir de la información del sensor mientras el pistón se mueve a lo largo de toda la carrera de desplazamiento del *microdrive*. La información de la señal fue obtenida a través del bus I²C después de ser leída y convertida por el ADS1000.

Para conseguir el mejor ajuste, se dividió la curva en tres partes y se obtuvieron los coeficientes para cada uno de los tres polinomios. A continuación se presentan los 3 polinomios de ajuste de curva obtenidos. El primer polinomio representa la zona marcada en color verde en la Figura 52, el segundo a la zona de color negro y el tercero a la zona roja.

1. $y = 0.00071x^4 - 0.14057x^3 + 10.36305x^2 - 354.27801x + 6523.83163$; $x < 611$
2. $y = -0.00021x^3 + 0.06688x^2 - 16.28876x + 2280.75224$; $611 \leq x \leq 1529$
3. $y = 0.00203x^4 + 1.3292x^3 - 325.205x^2 + 35339.588x - 1438157.46$; $1529 < x \leq 1802$

Donde:

- y : Es la distancia o el avance en [μm]
- x : Nivel de voltaje leído con ADS1000

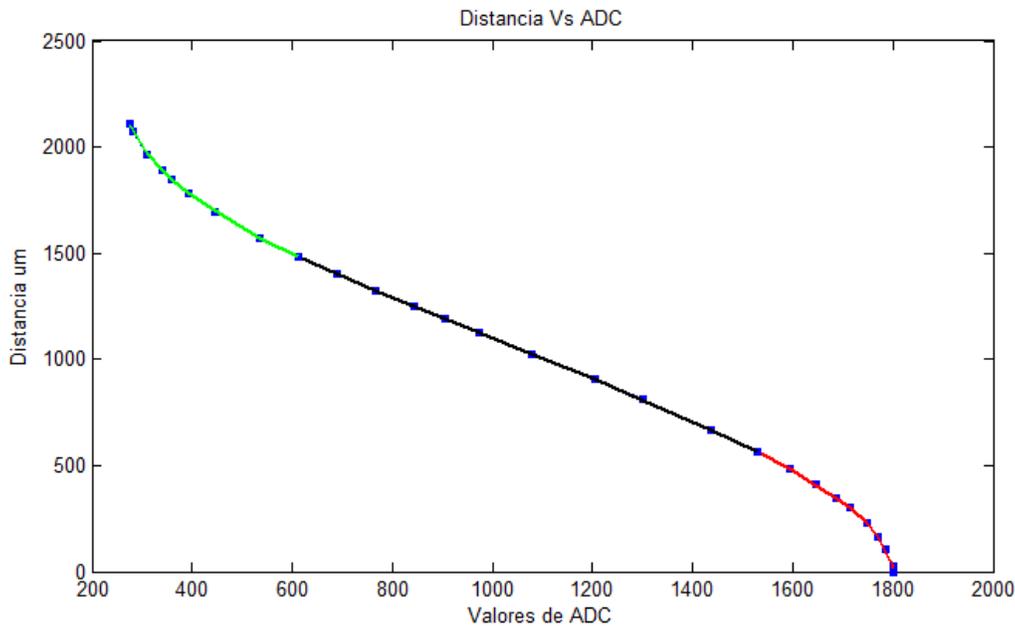


Figura 52. Ajuste de curva de la señal sensor. Los puntos azules son la representación gráfica de los datos obtenidos del experimento de calibración y las curvas en colores diferentes representan gráficamente al polinomio de ajuste.

El coeficiente de terminación (R^2) obtenido para los tres polinomios del ajuste de curva es igual a uno, lo cual estadísticamente indica que el ajuste de curva es perfecto. Por lo tanto, con estas tres ecuaciones es posible conocer la posición de los microelectrodos a partir del voltaje que brinda el sensor. Dichas ecuaciones fueron definidas para ser implementadas en un algoritmo de control programado, el cual se describe por medio de un diagrama de flujo en el anexo A.2.

4.2.3.3 Comunicación con la PC.

Otro requerimiento para el sistema de posicionamiento de electrodos en ratas, es controlar y monitorear la posición de la cánula (electrodos) desde un entorno visual en una computadora, para ello fue necesario establecer una comunicación de la PC con el microcontrolador PIC16F726, que fue definido para coordinar todas las funciones del sistema de control (apartado 4.2.3.4). Esta comunicación se consiguió a través del puerto serie utilizando el estándar RS-232 y una interfaz gráfica de usuario diseñada con LabVIEW. Dicha interfaz muestra la posición de los electrodos por medio de una gráfica (ver Figura 53), también contiene una caja de texto que captura a través del teclado el número correspondiente a la cantidad de micrómetros que se desea avanzar. Si el botón “Avanzar” es presionado, la computadora envía la información al microcontrolador, la cual corresponde

a la posición deseada. Esta interfaz también incorpora los botones para iniciar, detener, pausar y seleccionar el puerto serial (COM).

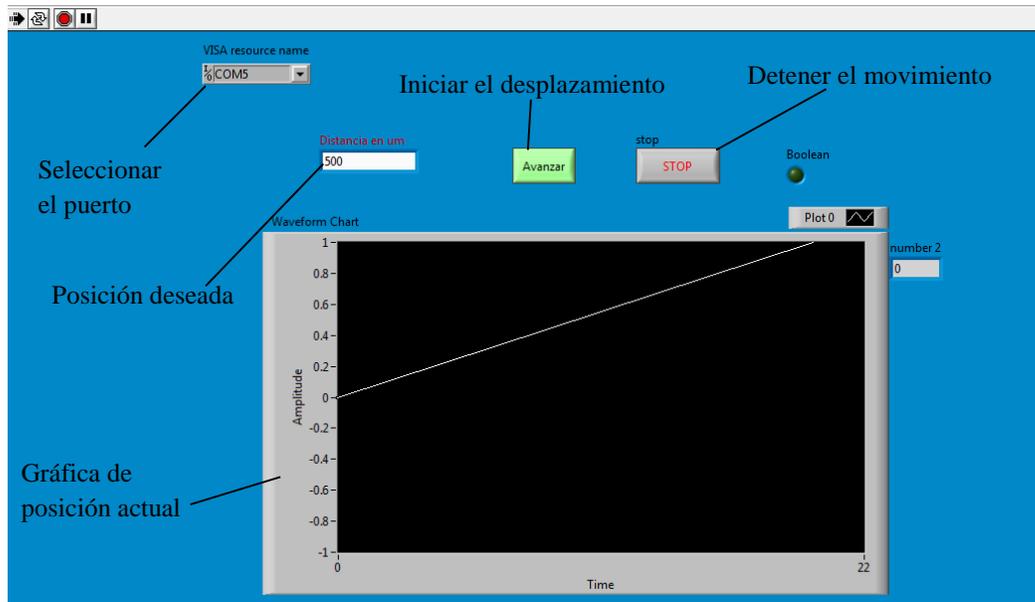


Figura 53. Interfaz gráfica de usuario para controlar al *Microdrive*

4.2.3.4 Control de posición.

Hasta este momento se sabe que el sistema de control del *microdrive* debe realizar varias funciones; la primera función es la de establecer comunicación con la PC a través del puerto serial RS-232, para recibir la información de la posición de los electrodos deseada por el usuario, dicha posición debe ser comparada con la posición sensada, la cual es proporcionada por el sistema de sensado vía I²C, si la posición deseada y la posición sensada son iguales, se repite el proceso de comparación, de lo contrario se toma la decisión de accionar al motor para mover la cánula. Para activar al motor es necesario establecer comunicación con el controlador de motores ultrasónicos piezoeléctricos (NSD-2101) que es el encargado de generar los pulsos, esta comunicación también se logra a través del bus I²C. Para coordinar, controlar, y programar todas las funciones descritas se eligió el PIC16F726 de Microchip.

Un microcontrolador es un circuito integrado (C.I.), el cual se compone de una unidad central de procesamiento conocida como CPU. También consta con apartados de memoria, ROM (Read-Only Memory) y RAM (Random Access Memory), puertos de entrada y salida para transmitir información y otros apartados llamados periféricos. Todas estas partes están conectadas de tal modo que podría decirse que forman una microcomputadora. En la Tabla 9 se resumen algunas de las características generales de los microcontroladores.

Tabla 9. Características generales de microcontroladores [20].

Microcontroladores	
Campo de aplicación	Automatización industrial. Sistemas de navegación. Aparatos portátiles. Robótica. Electrodomésticos. Sistemas de seguridad, alarmas, etc.
Tipos de memoria	ROM, OTP, EPROM, EEPROM y FLASH.
Periféricos comunes	Temporizadores, convertidores (ADC y DAC por ejemplo), PWM, canales de comunicación serie y paralelo, puertos E/S, interrupciones y otros.
Ventajas	Bajo costo. Flexibilidad en tamaño y características. Bajo consumo energético.
Desventajas	La memoria, en ocasiones no es suficiente. Pocas instrucciones.
Marcas	Intel, AMD, Motorola, IBM, TI, Microchip, etc.
Gamas	Enana, Baja, Media, Alta y Mejorada

Para seleccionar el microcontrolador, se consideraron las características que debía tener para cumplir con las tareas mencionadas. A continuación se enuncian las principales características con las cuales debe contar:

- ✓ I²C
- ✓ USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter)
- ✓ ADC de (Analog Digital Converter)
- ✓ Oscilador interno mayor a 8MHz
- ✓ Interrupción por puerto serial
- ✓ Tamaño pequeño
- ✓ Un puerto de E/S de 8bits como mínimo

El microcontrolador que cumple con las características deseadas es el PIC16F726 de Microchip, en la Tabla 10 se muestran sus características generales.

Tabla 10. Características generales del PIC16F726 [21].

PIC16F726	
Memoria de programa	14 Kbytes
RAM	Bytes
Oscilador interno	16MHz
Voltaje de operación mínimo y máximo.	1.8 - 5.5 Volts
Paquete del dispositivo/ Tamaño	28-UQFN (4mmx4mm)
Gama	Media

En el anexo A.2 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo programado en el microcontrolador y en el anexo A3 el código programado en PIC-C (CCS)

4.2.3.5 Hardware electrónico.

Al inicio del apartado 4.2.3 se dijo que, si la electrónica de control forma parte del mismo *microdrive*, existe la posibilidad de minimizar la cantidad de cables. Por lo cual se consideraron las características del hardware electrónico para diseñar la electrónica del sistema, debido a que influyen en el peso y en el volumen total del *microdrive*.

A lo largo de la descripción del sistema de control se ha hablado secuencialmente sobre los componentes electrónicos y circuitos integrados que conforman el sistema de control del *microdrive*, los cuales fueron seleccionados considerando su peso y sus dimensiones. A continuación se presenta una tabla que sintetiza los componentes que conforman el sistema electrónico con algunas de sus características, por ejemplo: el tipo de empaquetado, lo cual se relaciona directamente con las características físicas de los componentes. Después se muestra un diagrama de conexiones del diseño del sistema electrónico del nuevo *microdrive*.

Tabla 11. Componentes del sistema electrónico del *microdrive*

Silk	Nombre/valor	Empaquetado (dimensiones)	Descripción
U1	PIC16F726	QFN40P400X400X80-29	Microcontrolador, es el núcleo de este sistema de control.
U2	NSD2101	QFN65P400X400X80-17W2	Controlador de motores piezoeléctricos.
U3	ADS1000	SOT23-6	Convertidor analógico-digital de 10 bits de resolución y compatible con I ² C
J1	FH12-6S-0.5SH(55)	CON6_1X6_DRB_54548	Conector de cable plano de 6 vías. Aquí se conectan directamente el par de fases de ondas cuadradas que entran motor (conector para el motor).
J2	51441-0893	CON8_1X8_DRB_51441	Conector de control total del <i>microdrive</i> . Este conector sirve para alimentar completamente al sistema, para descargar las instrucciones al microcontrolador y contiene a TX y RX para la comunicación serial.
C1	470nF(0.47uF)	CAPC0603X33	Capacitores recomendados para la configuración típica de conexión del NSD-2101
C2	10uF	CAPC1608X87	
C3	47pF	CAPC1608X87	Capacitores recomendados para la configuración típica de conexión del ADS1000
C4	4.7uF	CAPC1005X55	
C5	0.1uF	CAPC1608X87	Capacitores para filtrar ruidos de tensión.
C6	0.1uF	CAPC1608X87	
R1	5.9K Ω	RESC3216X65	Resistencias pull-up para el funcionamiento del Bus I ² C.
R2	5.9K Ω	RESC3216X65	

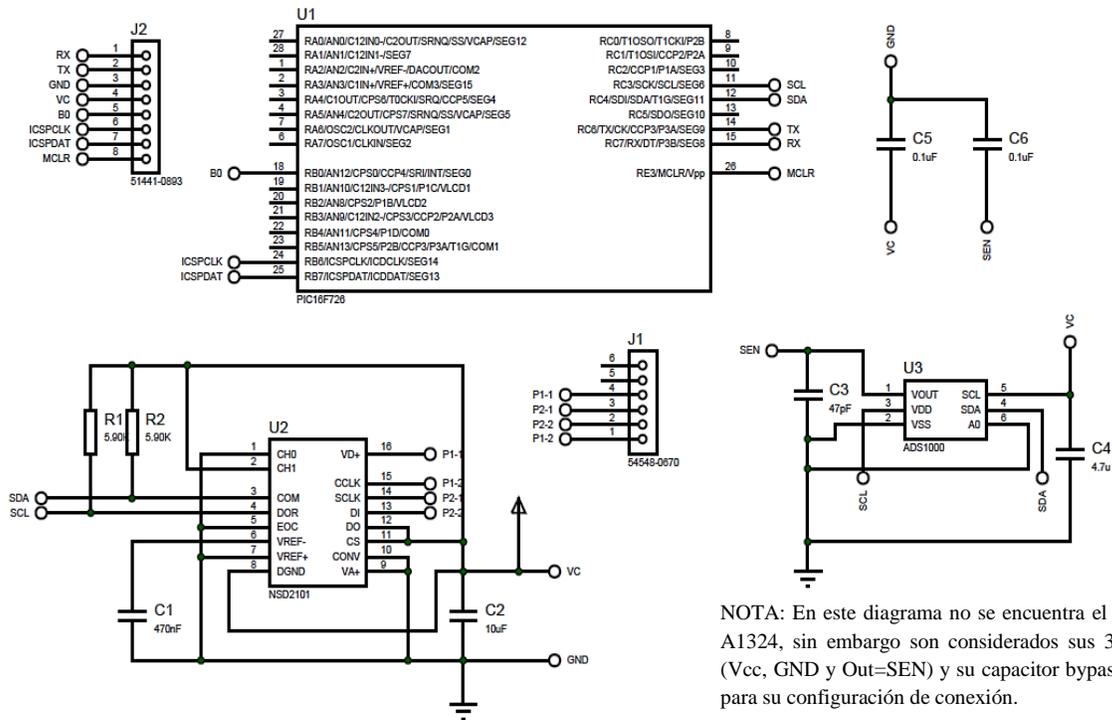


Figura 54. Diagrama esquemático de conexiones del sistema electrónico de control.

Partiendo del diagrama de conexiones de la Figura 54 se diseñó una tarjeta PCB (Printed Circuit Board) de doble cara con las menores dimensiones posibles y pistas de 200 μ m. Dicha tarjeta fue fabricada y los componentes de la Tabla 11 fueron montados sobre ella como se muestra en Figura 55, las dimensiones de la tarjeta resultaron 1.6cm x 1.6cm y 0.2cm de espesor. En el anexo A.4 se observa con más detalle el diseño de la tarjeta.

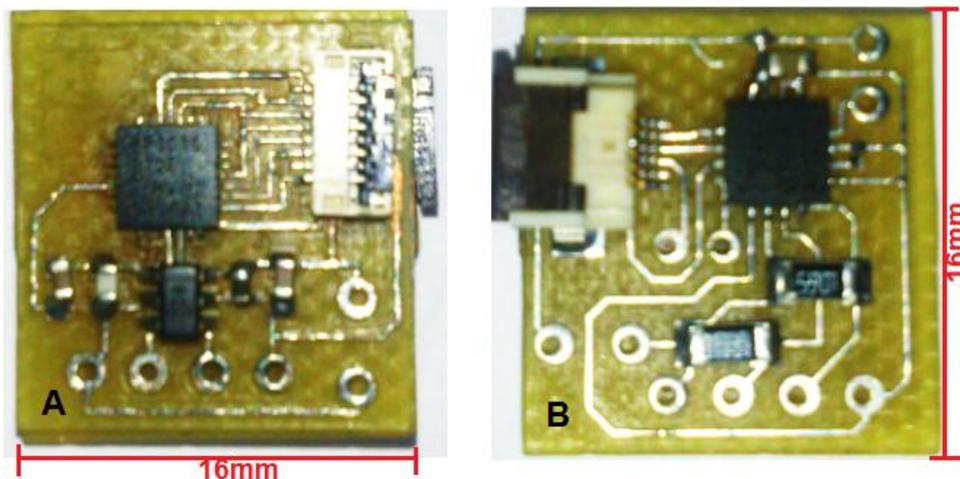


Figura 55. Tarjeta electrónica para el control del *microdrive*. El espesor de la PCB es 2mm (sin considerar componentes)

Finalmente la tarjeta electrónica de control fue unida y pegada con cianoacrilato al *microdrive* para completar el sistema de microposicionamiento. El cable del motor fue insertado al conector montado sobre la PCB y sensor se conectó a la tarjeta mediante tres cables aislados que corresponden a la alimentación y a la señal, por ultimo se hicieron las pruebas finales al sistema. En la Figura 56 se presenta el ensamble final de la nueva propuesta de *microdrive*.

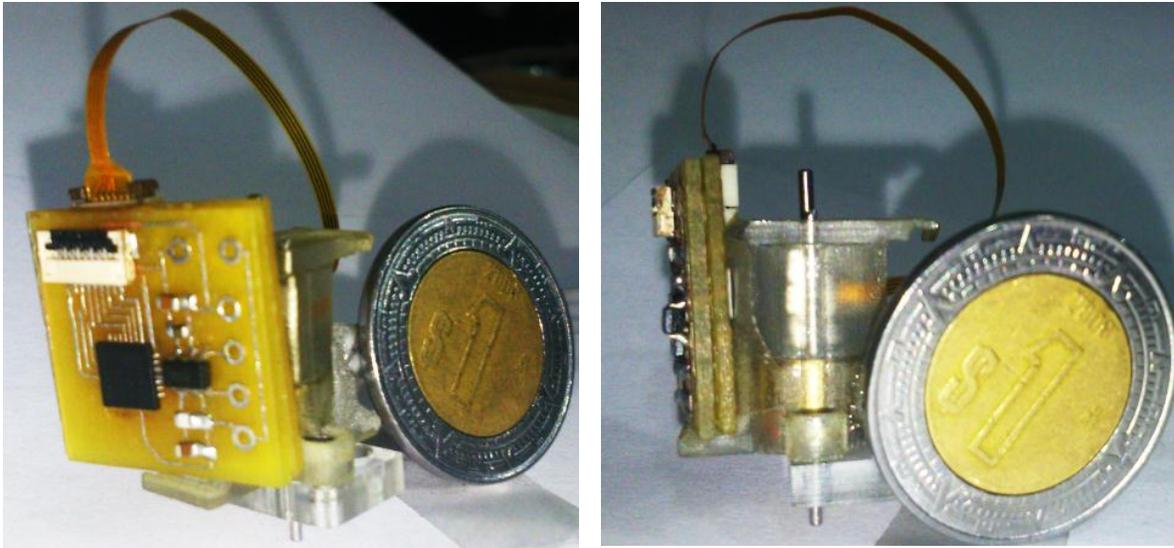


Figura 56. Vista comparativa del ensamble final de la nueva propuesta de *microdrive* y su hardware de control.

Capítulo 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo, se presentan las pruebas que se realizaron al sistema de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en ratas. Como primer paso se generaron pulsos para accionar al motor y generar los primeros desplazamientos del sistema, esto con el objetivo de identificar problemas en el movimiento. Como segunda prueba se midieron las desviaciones del movimiento lineal, para identificar la magnitud de los errores del seguimiento de la trayectoria en distintas posiciones.

La tercera prueba que se le hizo al sistema fue para evaluar la resolución de los avances, la cual se define como el mínimo desplazamiento que realiza la cánula cuando el sistema es accionado, de igual manera se evaluó el rango de los desplazamientos (o carrera). Por otra parte, también se analizó la efectividad del posicionamiento automático para encontrar el error entre la posición sensada y la real. Finalmente, se realizaron mediciones del peso y volumen del sistema completo.

Para realizar la mayoría de estas pruebas se hizo uso del mismo banco de pruebas descrito en la sección 4.2.3.2.2.

5.1 Movimiento del sistema y medición de los desvíos de la trayectoria.

Para generar los primeros desplazamientos fue necesario escribir una serie de datos vía I²C en los registros del NSD-2101 como se dijo en el apartado 4.2.3.1. Primero se estableció la frecuencia de los pulsos de salida, para ello se escribió el número binario 1001 0001 (145 en decimal) en el registro 01h para establecer una frecuencia de 172.4 kHz. Posteriormente, para iniciar la generación de pulsos se modificó el valor por default (cero) del contador de pulsos, el cual corresponde a los registros 02h y 03h. Al principio solo se modificó el valor de la parte menos significativa (registro 03h), escribiendo el número binario 1010 (10 en decimal) para generar 10 pulsos. Sin embargo, no se presentó ningún movimiento en el sistema, después se fue aumentado el valor de los pulsos hasta llegar a 50, con los que se generó un desplazamiento de 1µm.

Por otra parte, para evaluar la rectitud del movimiento que sigue la cánula y medir los desvíos lineales en x e y , fueron generados 16 desplazamientos con un número aleatorio de pulsos. Las primeras 8 mediciones se hicieron respecto al eje y , es decir; la cánula se orientó en el eje z como se ve en la Figura 57.B, las otras mediciones se hicieron en x con la cánula

orientada también orientada en z (Figura 57.C). En la Figura 58 se muestran las gráficas de los datos obtenidos con respecto a cero.

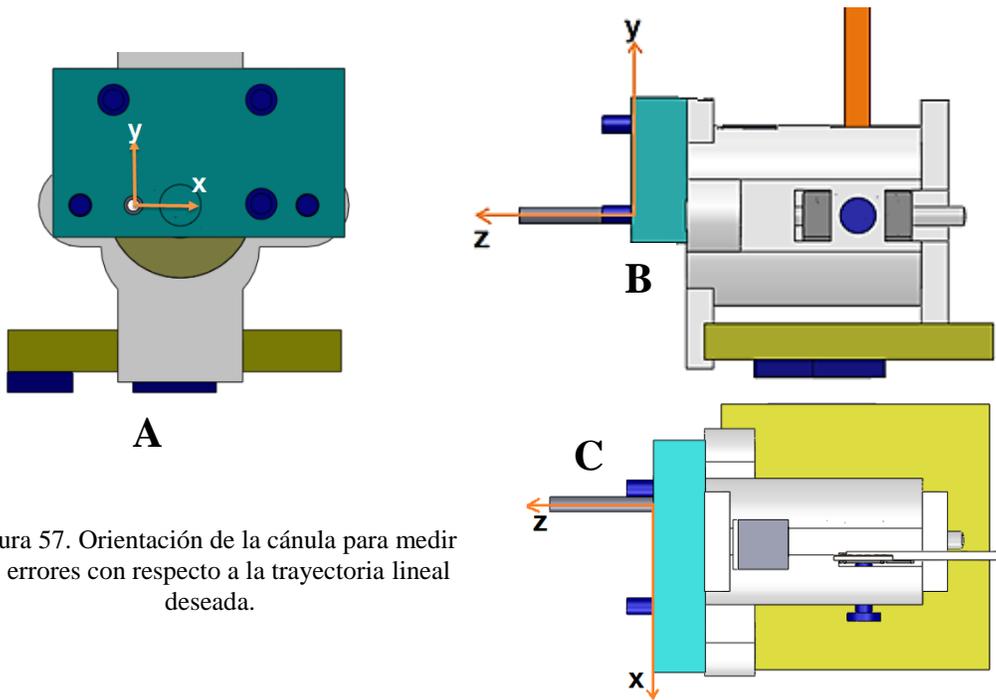


Figura 57. Orientación de la cánula para medir los errores con respecto a la trayectoria lineal deseada.

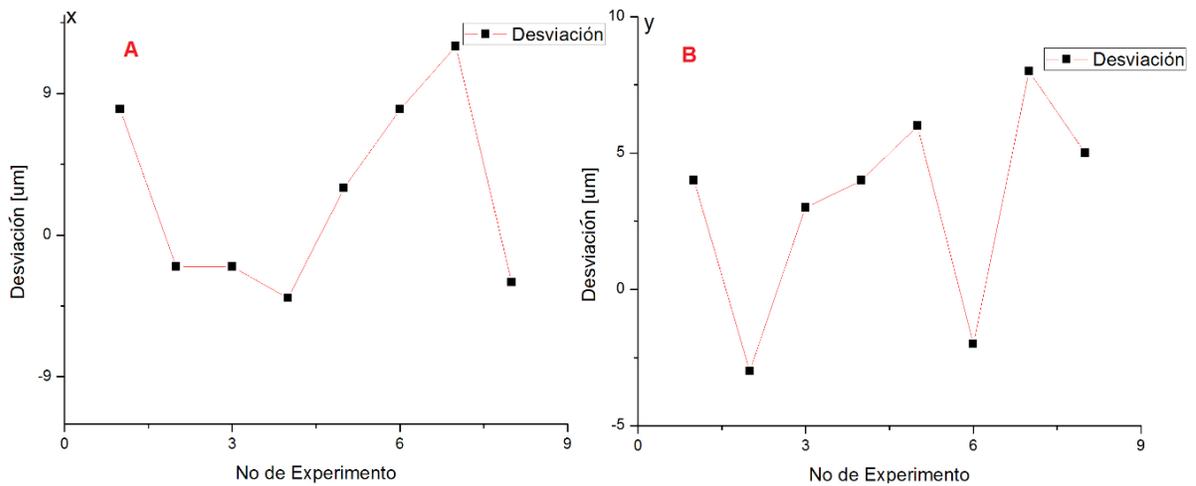


Figura 58. Desviaciones lineales en y y x de la trayectoria producida por la cánula cuando se encuentra desplazándose.

Cuando la cánula se desplaza en el plano xz , con dirección del eje z , genera movimientos laterales en un intervalo que va de cero de hasta $10\mu\text{m}$ (Figura 58.A). Por otra parte, el intervalo de desviaciones de la trayectoria sobre el eje y cuando la cánula se ubica en diferentes posiciones es de hasta $8\mu\text{m}$ (Figura 58.B). Sin embargo estas desviaciones apenas

son aceptables considerando que una neurona tiene un tamaño general que va desde los 10 μ m hasta los 50 μ m.

5.2 Resolución y rango de desplazamiento

El rango de desplazamiento es 2046 μ m. Este dato fue obtenido durante el proceso de calibración del sensor en el apartado 4.2.3.2.2 de este trabajo, en la Figura 51 también se puede observar esto.

Por otra parte, la resolución del *microdrive* se definió como el desplazamiento mínimo estable que puede hacer el sistema con el mínimo número de pulsos alimentados al motor. La resolución depende de muchos factores como la fricción y la orientación de los elementos que componen al mecanismo e incluso del motor. De modo tal que la resolución empírica (o experimental) de este *microdrive* es de 1 μ m. Para establecer lo anterior, nuevamente se hace referencia al ejercicio en el cual pequeñas cantidades de pulsos se aplicaron repetitivamente al *microdrive*, donde se identificó que los desplazamientos más estables se generan cuando se introducen 50 pulsos. Pero considerando el sistema de sensado, la resolución del *microdrive* es gobernada por el sensor de desplazamiento y el convertidor analógico digital. De modo tal que, considerando el rango de desplazamiento (0-2046 μ m) y el valor digital correspondiente, el cual va de 275 a 1804, entonces la resolución del sistema se obtiene como sigue:

$$resolución = \frac{2046\mu m}{1804 - 275} = 1.33\mu m$$

Lo anterior, indica que el incremento de un bit corresponde a un desplazamiento de 1.33 μ m, por lo tanto el sistema de control de la posición puede realimentar el valor de la posición con incrementos de 1.33 μ m.

5.3 Evaluación del sistema de posicionamiento automático

Para evaluar el sistema de posicionamiento automático se realizaron diferentes movimientos controlados (posiciones deseadas) a lo largo de la carrera de desplazamiento del *microdrive*, con los valores de: 28 μ m, luego 100 μ m y así hasta llegar al fin de carrera (2046 μ m). Las posiciones de cada evento fueron medidas primero con el proyector de perfiles, a lo que se denominó posición real y después con el sistema de sensado, medida considerada como posición sensada. Los datos obtenidos de estas mediciones fueron comparados y analizados con respecto a la posición deseada por medio de un análisis de

regresión lineal. En un principio se hizo un análisis de comparación entre la posición deseada y la posición real a través de un diagrama de dispersión el cual se muestra en la Figura 59.

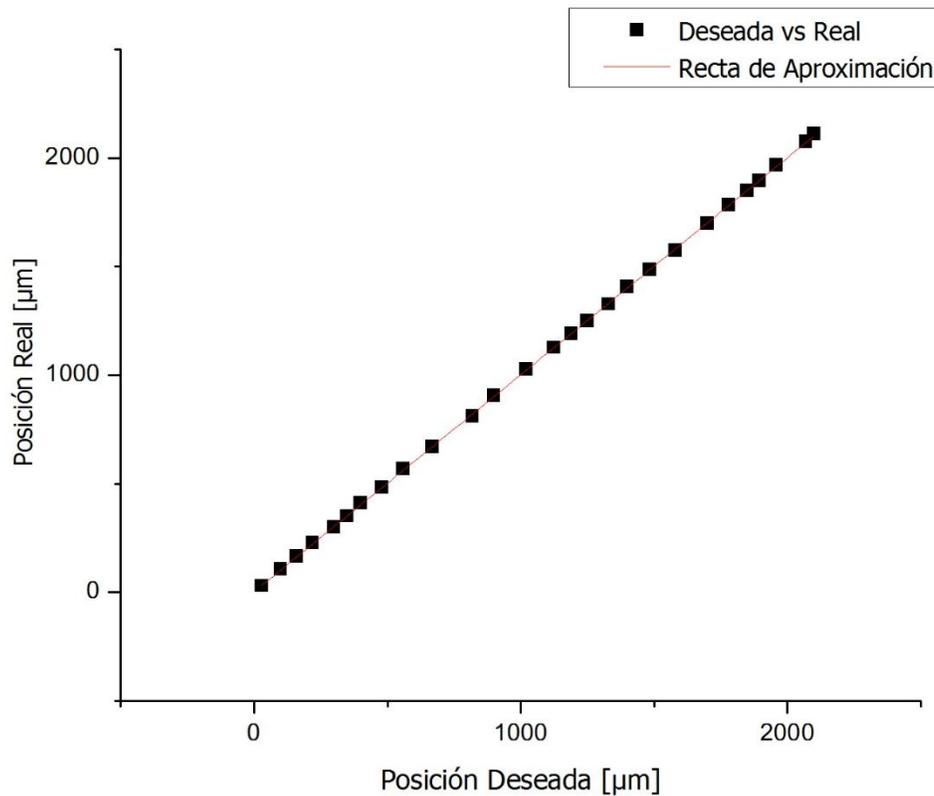


Figura 59. Diagrama de dispersión, de la posición deseada con la posición real y recta de regresión.

El diagrama de dispersión ilustra que el comportamiento del posicionamiento real es muy parecido al deseado sin embargo, para cuantificar el grado de relación que hay entre las variables se hizo una aproximación lineal, de donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 12. Resultados de la aproximación lineal del diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición real.

Ecuación:	$y = ax + b$
a	0.99954
B	2.27815
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9999

Considerando que la aproximación lineal es la ideal, debido a que se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9999. Los resultados muestran que el posicionamiento tiene un

comportamiento lineal, debido a que se obtuvo una pendiente (a) muy cercana a 1 lo cual nos indica que la posición real está muy cerca de la posición deseada. Sin embargo, considerando la ordenada al origen (b) y haciendo referencia a la posición deseada de cero, se podría interpretar que hay un error por offset cercano a $2.2\mu\text{m}$. Para observar de mejor manera el comportamiento de los errores de la posición real con respecto a la deseada se graficaron los residuos generados a partir del ajuste lineal (ver Figura 60).

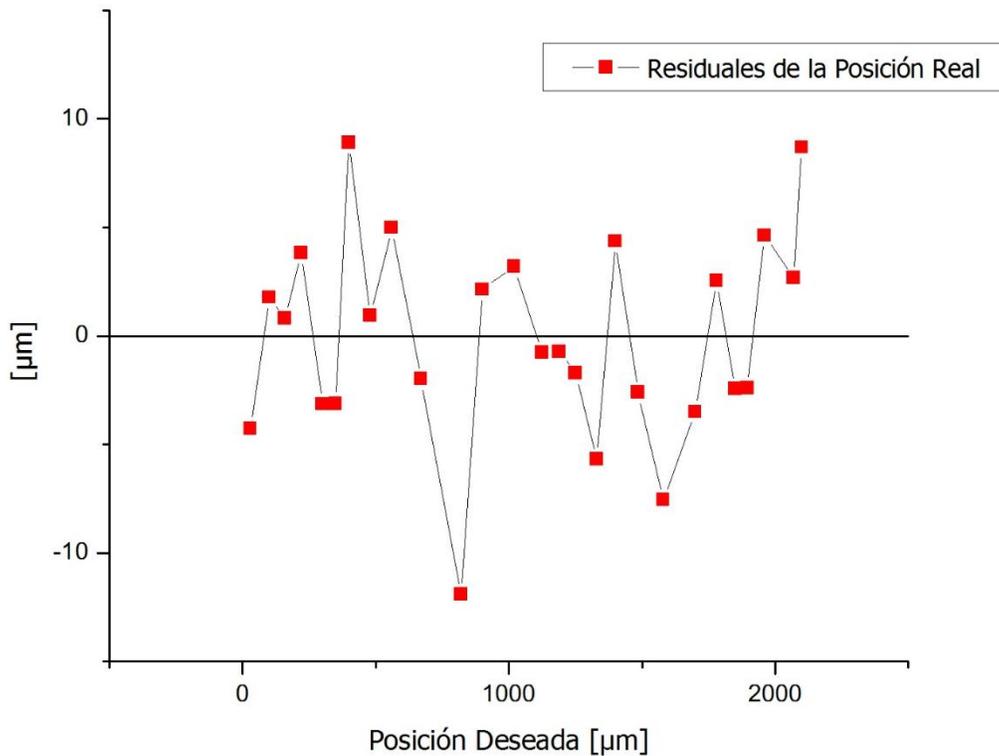


Figura 60. Errores residuales de la posición real con respecto a la aproximación lineal.

De la gráfica de los errores residuales, se observa que las diferencias de la posición real con respecto del deseado, tienen un comportamiento muy aleatorio siendo el error máximo $11\mu\text{m}$ por debajo de cero (media) cuando la posición deseada es $820\mu\text{m}$, el error mínimo $0.73\mu\text{m}$ cuando la posición desea es $1190\mu\text{m}$ y el error promedio $0.179\mu\text{m}$. Para obtener un panorama más claro del comportamiento de estos errores se generó el siguiente histograma.

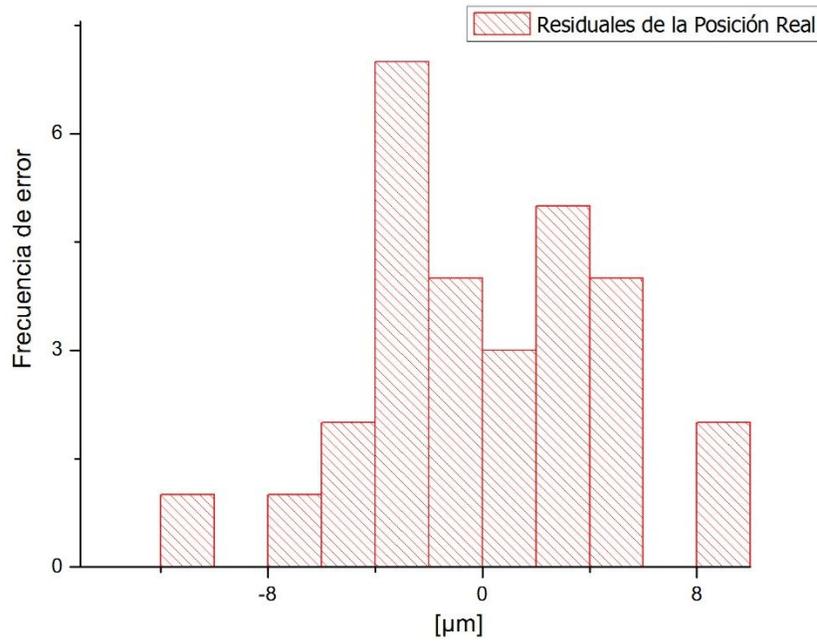


Figura 61. Histograma de los errores residuales de la posición real con respecto a la deseada.

El histograma deja ver que los errores de posicionamiento, no precisamente tienen un comportamiento similar al de una distribución normal, a pesar de ello, los errores de posicionamiento se tienen dentro de una desviación estándar de $4.996\mu\text{m}$ de modo tal que a partir de esta información se puede decir que el posicionamiento automático tiene un error o una incertidumbre de $\pm 4.996\mu\text{m}$. Esto significa que el valor de la posición cae en un rango de $9.8\mu\text{m}$, este valor apenas es aceptable ya que la resolución deseada de los desplazamientos es $10\mu\text{m}$.

5.4 Evaluación del sistema de sentido

Se sospecha que los errores del posicionamiento son consecuencia del sistema de sentido de la posición. Para dar respuesta a esta hipótesis, también se realizó un análisis de comparación de la posición sensada con respecto a la posición deseada. El diagrama de dispersión y el ajuste lineal se muestran en la Figura 62 y los resultados de la aproximación lineal en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de la aproximación lineal del diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición sensada.

Ecuación:	$y = ax + b$
a	0.99954
B	1.51482
Coefficiente de determinación (R^2)	0.99994

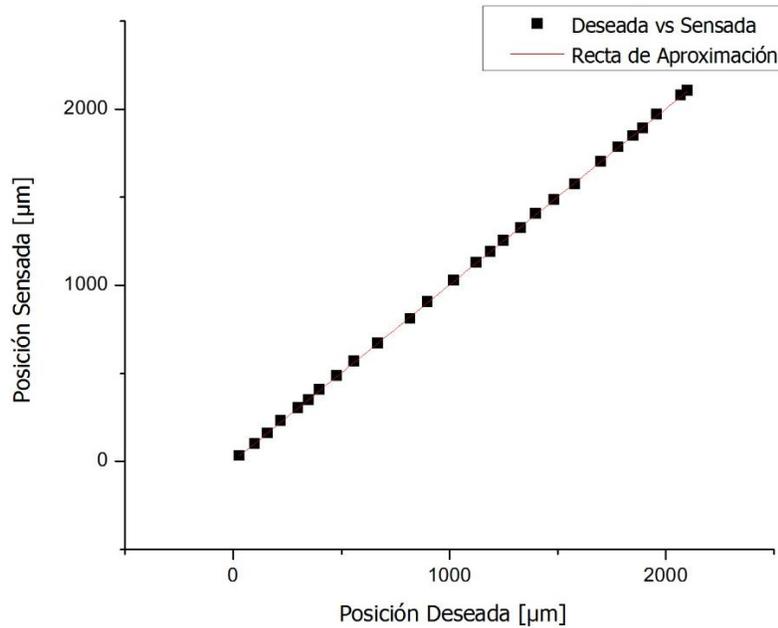


Figura 62. Diagrama de dispersión de la posición deseada con la posición sensada y recta de regresión.

Al igual que la posición real, el comportamiento de la posición sensada es lineal como se ve en la gráfica anterior. Para observar la magnitud de los errores de la posición medida con el sensor respecto de la deseada, también se graficaron los errores residuales (ver Figura 63), de donde deduce que la diferencia más grande es $13\mu\text{m}$, la mínima es $0.01448\mu\text{m}$ y el promedio es 2.97×10^{-14} (prácticamente cero).

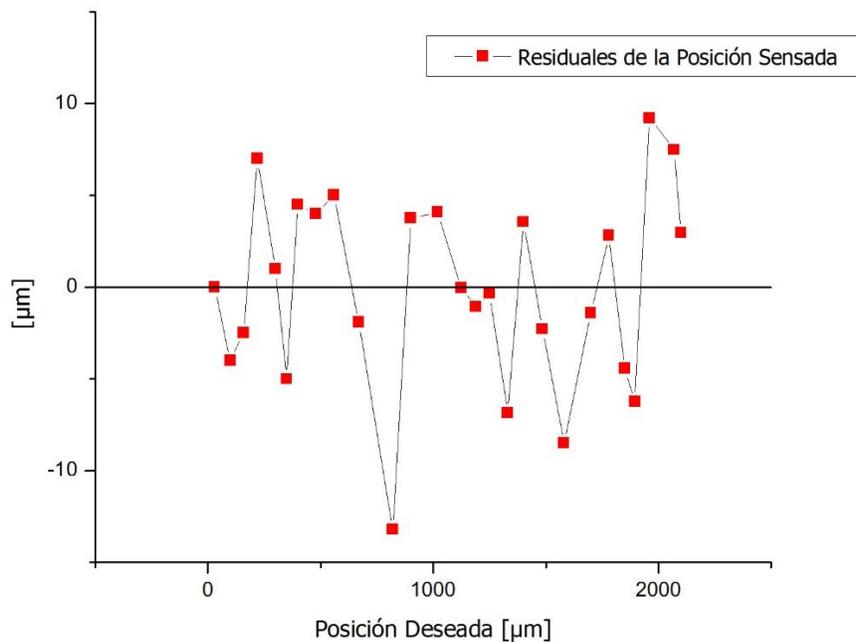


Figura 63. Errores residuales de la posición sensada con respecto a la aproximación lineal.

Finalmente, también se construyó el histograma de los residuos de la posición sensada (Figura 64), esta vez, los residuos tienen un comportamiento más parecido al de una distribución normal. La desviación estándar para este caso está en $5.18\mu\text{m}$.

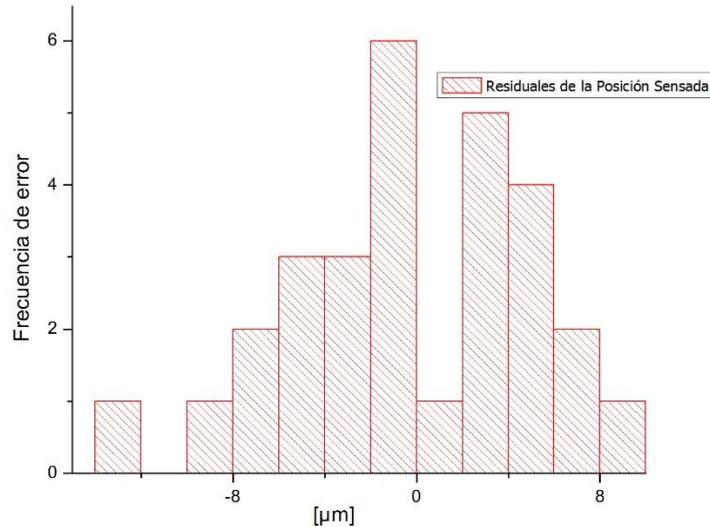


Figura 64. Histograma de los errores residuales de la posición sensada con respecto a la deseada.

Si se observan los dos histogramas (Figura 61 y Figura 64) se puede notar que son muy similares. Además, los errores residuales de la posición real tienen desviación estándar de 4.99 y los de la posición sensada 5.18 lo cual indica que los errores tienen un comportamiento muy similar. Esto también se puede ver si se grafican los dos errores residuales como se ve en la figura de abajo.

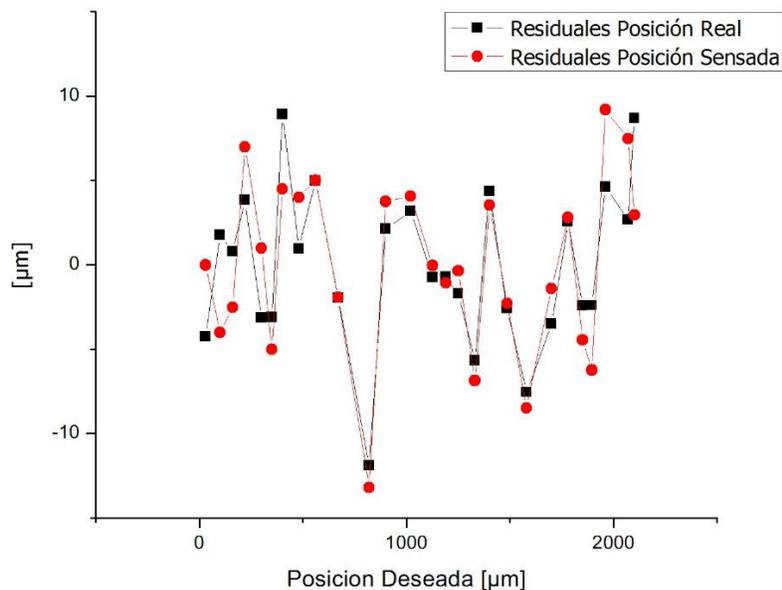


Figura 65. Errores residuales de la posición real y la posición sensada con respecto a la aproximación lineal

Con base en la figura anterior, se puede ver que la gráfica del error residual del análisis de la posición medida (posición real) es muy similar a la gráfica del error residual para el análisis de la posición sensada. Por lo anterior, se puede decir que el sistema de sensado funciona de manera correcta. Por lo tanto, el valor de la posición sensada está muy cerca del valor real como se puede observar en la Figura 66.A. Sacando la diferencia entre la posición sensada y la real se obtiene un error máximo de $5\mu\text{m}$ (ver Figura 66. B) y una desviación estándar de 2.83, por lo tanto la posición sensada es igual a la posición real $\pm 2,83\mu\text{m}$.

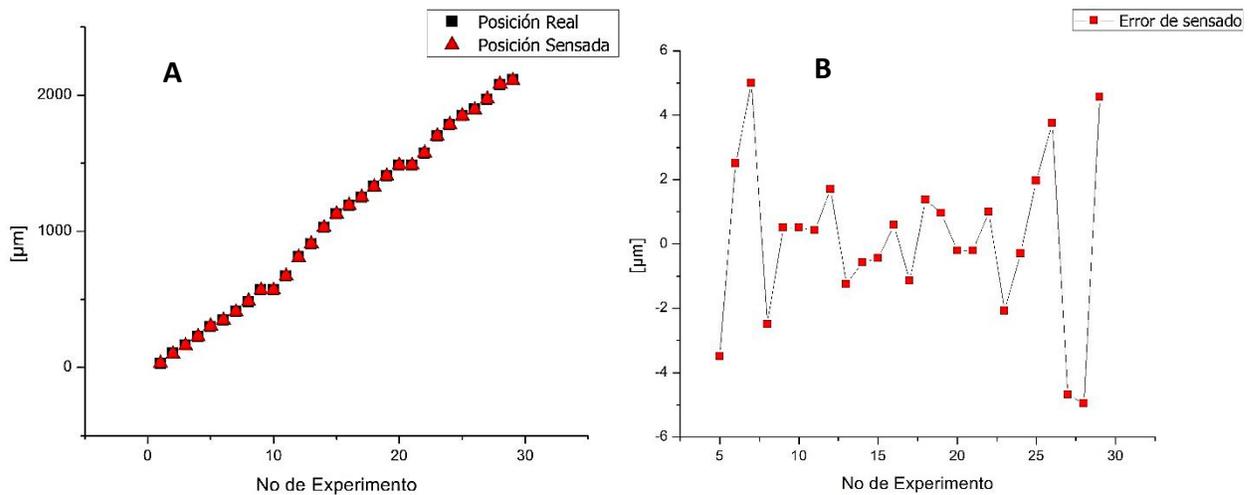


Figura 66. (A) Comparación del desplazamiento medido por el sistema de sensado y el por el proyector de perfiles en 30 posiciones diferentes. (B) Errores de posición sensada con respecto a la posición real.

Analizando la información obtenida hasta este momento, se piensa que existe la posibilidad de disminuir casi a la mitad el error de posicionamiento automático, esto debido a que el error promedio de posicionamiento obtenido es de $\pm 4.99\mu\text{m}$ y el error de la posición sensada con respecto a la real es $\pm 2,83\mu\text{m}$, de modo tal que, idealmente se debería tener un error igual que el del sensor, por lo tanto se concluye que el control implementado para el movimiento del motor también tiene participación en el error de posicionamiento automático.

5.5 Dimensiones físicas

Finalmente se midieron las características de peso y volumen del *microdrive* completo. El volumen se calculó con las herramientas del software con el que se realizó el CAD y el peso se determinó con la ayuda de una balanza de laboratorio. Estas características son:

Tabla 14. Volumen del nuevo sistema de posicionamiento de microelectrodos.

Elemento	Volumen [mm ³]
<i>Microdrive</i>	735.3
Montura	294
Tarjeta electrónica	512
Total	1541.3

Tabla 15. Peso del nuevo sistema de microposicionamiento de microelectrodos

Elemento	Peso [g]
<i>Microdrive</i>	2.6
Montura	0.3
Tarjeta electrónica	1.2
Total	4.1

El peso obtenido del nuevo sistema de microposicionamiento es de 4.1g y el volumen total es de 1.54cm³, lo cual indica que se disminuyó un 70% del peso y un 54% del volumen de los 14g y 3.37cm³ correspondientemente deseados. Ahora bien, experimentalmente, se ha encontrado que una rata Wistar con pesos entre 200g y 320g puede contener sobre su cabeza un peso de 14g, mientras tanto un ratón de 25g es capaz de mantener una carga de 5g. Así que este *microdrive* puede ser utilizado con estos dos tipos de animales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se plasmó una visión general sobre los problemas que se presentan en estudios de electrofisiología con ratas. Después se presentó un panorama general acerca de los dispositivos de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en ratas que se han desarrollado buscando solucionar los problemas.

Se diseñó y se construyó un nuevo dispositivo automatizado basado en un motor piezoeléctrico para posicionar un arreglo de microelectrodos en el cerebro de ratas con resolución micrométrica. Se diseñó un mecanismo de desplazamiento lineal compuesto de 4 elementos principales, lo que minimiza la existencia de los problemas mecánicos. Este mecanismo puede soportar los golpes y vibraciones que puedan ser causadas por la rata durante la experimentación.

Para facilitar el montaje del dispositivo en la cabeza de la rata, se diseñó una montura que considera el punto en el que se introduce la cánula para el registro de actividad. Dicha montura se fija con tornillos al cráneo y brinda soporte al *Microdrive*.

Se implementó un sistema de control de la posición con ayuda de un sensor de desplazamiento para lograr avances precisos en el *Microdrive*.

Por último se realizaron algunas pruebas al nuevo sistema de microposicionamiento, poniendo interés principal a la cánula, elemento que guía y se mueve junto con los microelectrodos. De estas pruebas, primeramente se identificó que el motor no tiene problemas para actuar al sistema, después, se observó que el movimiento longitudinal que realiza la cánula presenta desvíos laterales máximos de $10\mu\text{m}$, lo cual aún es aceptable considerando que una neurona tiene un tamaño general que va desde los $10\mu\text{m}$ hasta los $50\mu\text{m}$. Por otro lado, el rango o la carrera de desplazamientos que presenta este nuevo *microdrive* es $2046\mu\text{m}$, lo que indica que faltaron $954\mu\text{m}$ para cumplir con la especificación de los 3mm. Sin embargo, la distancia ideal en la cual se trabaja buscando actividad neuronal es 2mm, demodo que el rango es aceptable.

De las pruebas realizadas al sistema, también se encontró que la resolución de los avances obtenida es de $1.33\mu\text{m}$, con una incertidumbre de $\pm 4.996\mu\text{m}$, esto es consecuencia de los errores del sistema de sensado de la posición, los cuales están en el orden de $\pm 2.83\mu\text{m}$ y se piensa, que el algoritmo de control implementado en el microcontrolador también tiene participación en este error. Sin embargo, considerando la resolución ($1.33\mu\text{m}$) y los errores del posicionamiento automático ($4.9\mu\text{m}$) se tienen desplazamientos menores a $7\mu\text{m}$ por lo cual se mejoró en un 30% la resolución deseada.

Finalmente el peso del nuevo sistema de microposicionamiento es adecuado para registrar actividad neuronal tanto en ratas como ratones.

TRABAJO A FUTURO

Como trabajo restante es necesario implantar el dispositivo desarrollado en una rata viva y realizar experimentos con el fin buscar actividad neuronal. Para ello, necesariamente se requiere del apoyo incondicional de gente que tenga experiencia y conocimiento en este tipo de estudios, ya que es necesario primeramente, ajustar la longitud de la cánula, la cual debe introducirse en el cerebro sin considerar la distancia o desplazamiento de trabajo, después se debe introducir un número específico de microelectrodos dentro de la cánula, los cuales deben tener una cierta impedancia, sin olvidar que se debe considerar un electrodo como referencia.

Por otra parte, es necesario realizar una cirugía estereotáxica, para fijar la montura, y posteriormente el *microdrive*. Finalmente, como se dijo en el apartado 2.1, es necesario acoplar el *microdrive* al subsistema de extracción de señales eléctricas, provenientes de los potenciales de acción de las neuronas, este subsistema trata de preamplificadores, amplificadores, acondicionadores e interpretadores de las señales.

Por otra parte, un posible camino para eliminar los errores del posicionamiento automático es mejorar la manufactura modificando y analizando las tolerancias de fabricación del pistón y el buje principalmente. Otro posible camino para alcanzar la posición deseada con un margen de error menor es sustituir el control *on-off* por un sistema de control automático, el reto en este caso primeramente es proponer el modelo matemático del sistema y después diseñar el controlador.

REFERENCIAS

- [1] Gary S. Aston-Jones and George R. Siggins, *Psychopharmacology: The Fourth Generation of Progress* (Chapter 5: Electrophysiology), Publisher Lippincott Williams & Wilkins, 4th edición, New York, EUA, 1995.
- [2] J. D. Enderle, S.M. Blanchard, J. D. Bronzino, “Introduction to Biomedical engineering”, Publisher Elsevier Academic Press, 2th edición, San Diego California, USA, 2005
- [3] Aston-Jones G, Alexinsky T. “Discharge of noradrenergic locus coeruleus neurons in behaving rats and monkeys suggests a role in vigilance”. *Prog Brain Res* 1991;88:501–520.
- [4] D.k. Bilkey, N. Russell and M. Colombo, “A lightweight *microdrive* for single-unit recording in freely moving rats and pigeons”, *Methods*, vol. 30, February 2003, pp. 152-158.
- [5] V.A. Korshunov, “Miniature *microdrive*-headstage assembly for extracellular recording of neuronal activity with high-impedance electrodes in freely moving mice”, *Neuroscience Methods*, vol. 158, Elsevier, May 2006, pp. 179-185.
- [6] George Paxinos, Charles Watson, “The Rat Brain in Stereotaxic Coordinates” Publisher Academic Press, 3th edición, San Diego California, USA, 1997
- [7] D.k. Bilkey and G.M. Muir, “A low cost, high precision subminiature *microdrive* for extracellular unit recording in behaving animals”, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 92, Elsevier, June 1999, pp. 87-90.
- [8] F. Haiss, S. Butovas, and C. Schwarz, “A miniaturized chronic microelectrode drive for awake behaving head restrained mice and rats”, *Journal of Neuroscience Methods*, vol.187, Elsevier, 2010, pp. 67-72.
- [9] X. Zheng, J. Zeng, T. Chen, Y. Lin, L. Yu, Y. Li, Z. Lin, X. Wu, F. Chen, D. Kang and S. Zhang, “A movable microelectrode array for chronic basal ganglia single-unit electrocorticogram co-recording in freely behaving rats”, *Neurological Sciences*, Springer, Verlag Italia, May 2014, pp. 1-10.
- [10] T. Sato, T. Suzuki, and K. Mabuchi, “A new multi-electrode array design for chronic neuronal recording, with independent and automatic hydraulic positioning”, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 160, February 2007, pp. 45-51.
- [11] M.S. Fee and A. Leonardo, “Miniature motorized *microdrive* and commutator system for chronic neuronal recording in small animals”, *Journal of Neuroscience Methods*, Elsevier, vol. 112, 2001, pp. 83-94.

- [12] A. Caballero-Ruiz, L. Ruiz-Huerta, H. Silva and G. Herrera-Granados, “Sistema de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en ratas”, *9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Las Palmas de Gran Canaria, 2009, pp. 165-171
- [13] S. Park, E. Yoon, S. Lee, Hee-sup Shin, H. Park, B. Kim, D Kim, J. Park, and S. Park, “The development of a PZT-based *microdrive* for neuronal signal recording”, *Smart materials and structures*, 2008, pp. 7.
- [14] S. Yang, S. Lee, K. Park, H. Jeon, Y. Huh, J. Cho, Hee-Sup Shin and Eui-sung Yoon, “Piezo motor based *Microdrive* for Neuronal Signal Recording”, *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2008, pp. 3364-3367.
- [15] S. Yang, J. Cho, S. Lee, K. Park, J. Kim, Y. Huh, Eui-sung Yoon and Hee-Sup Shin, “Feedback controlled piezo-motor *microdrive* for accurate electrode positioning in chronic single unit recording in behaving mice”, *Journal of Neuroscience Methods*, Elsevier, 2011, pp. 117-127.
- [16] Kenji Uchino and Jayne R. Giniewicz, *Micromechatronics*, Publisher Marcel Dekker, New York, Basel, EUA, 2003.
- [17] D. Mesonero-Romanos, J.F. Fernández y otros, “Comparación entre sistemas electrocerámicos de desplazamiento mecánico. Motores y actuadores piezoeléctricos”, *Journal cerámica y vidrio*, España, 2004.
- [18] SQL-RV-1.8 SQUIGGLE® Motor, User Manual, Revision A., New Scale Technologies, NY, 2010.
- [19] TULA (Tiny Ultraonic Linear Actuator), 3 de dicimbre de 2014. http://www.piezo-tech.com/eng/index.php?hCode=PRODUCT_02_01.
- [20] Héctor Hugo Silva López, Desarrollo de un sistema de control para una micromáquina herramienta basado en el código estándar para CNC. Facultad de Ingeniería. Ciudad Universitaria. Septiembre, 2008. Tesis de maestría en ingeniería eléctrica-sistemas electrónicos.
- [21] Microchip Technology. Inc., PIC16F72X/PIC16LF72X Data Sheet, 2009.
- [22] “NSD-2101 Piezo Motor Driver ASIC for SQL-RV Series Reduced Voltage SQUIGGLE® RV and UTAF™ Motors data sheet,” Austriamicrosystems, Graz, Austria.
- [23] J. Optics, Available:<http://www.ub.edu/javaoptics/teoria/castella/node15.html>. [Último acceso: Noviembre 2014].

ANEXOS

A.1 Código de MATLAB para la aproximación polinomial de la curva del sensor

```
%% con el ADC del pic%
close all
fprintf('primer polinomio 904-760');
adc1=part1(:,1)/1;      %%se divide entre 10 para hacer más grandes
los coeficientes esta adecuación se considera en la programación del pic
dist1=part1(:,2);
plot(adc1,dist1,':s','MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','b');
title('Distancia Vs ADC');
xlabel('Valores de ADC');
ylabel('Distancia um');
p1=polyfit(adc1,dist1,4);
pp1=polyval(p1,adc1)
hold on
plot(adc1,pp1,'r','linewidth',2);
fprintf(1,'%6.8f\n',p1(1));
fprintf(1,'%6.8f\n',p1(2));
fprintf(1,'%6.8f\n',p1(3));
fprintf(1,'%6.8f\n',p1(4));
fprintf(1,'%6.8f\n',p1(5));

fprintf('segundo polinomio 760-300\n');
adc2=part2(:,1)/1;
dist2=part2(:,2);
plot(adc2,dist2,':s','MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','b')
title('Distancia Vs ADC');
xlabel('valor de ADC');
ylabel('distancia um');
p2=polyfit(adc2,dist2,3);
pp2=polyval(p2,adc2)
hold on
plot(adc2,pp2,'bla','linewidth',2)
p2(1);
p2(2);
p2(3);
p2(4);
fprintf(1,'%6.8f\n',p2(1));
fprintf(1,'%6.8f\n',p2(2));
fprintf(1,'%6.8f\n',p2(3));
fprintf(1,'%6.8f\n',p2(4));

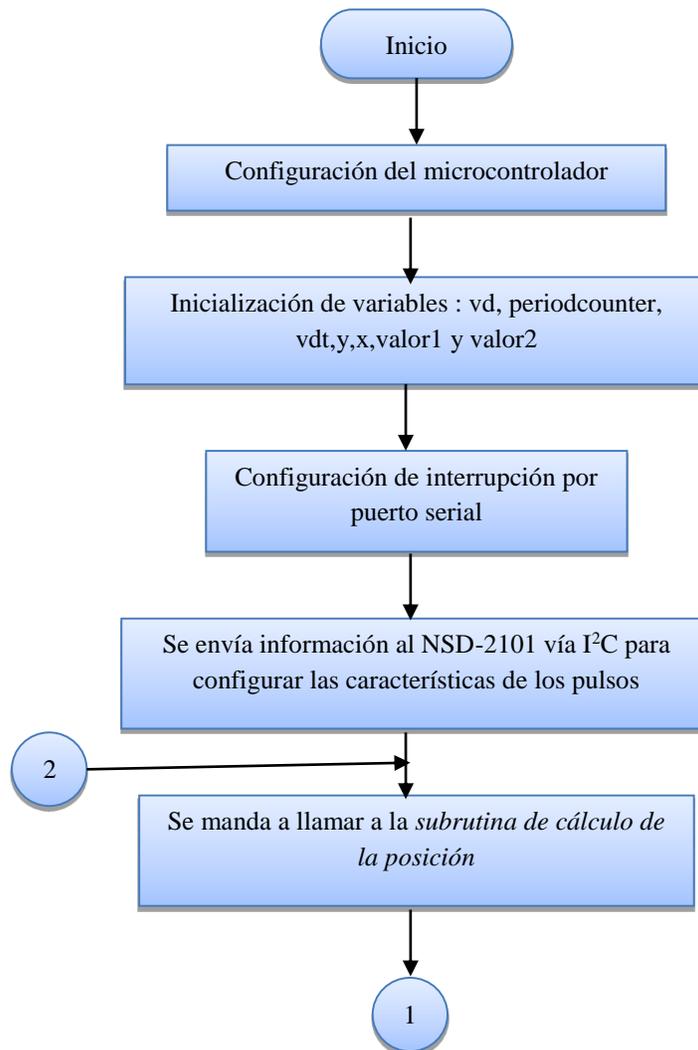
fprintf('tercer polinomio 300-146')
adc3=part3(:,1)/1;
dist3=part3(:,2);
plot(adc3,dist3,':s','MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','b')
title('Distancia Vs ADC')
xlabel('Valores de ADC')
ylabel('Distancia um')
```

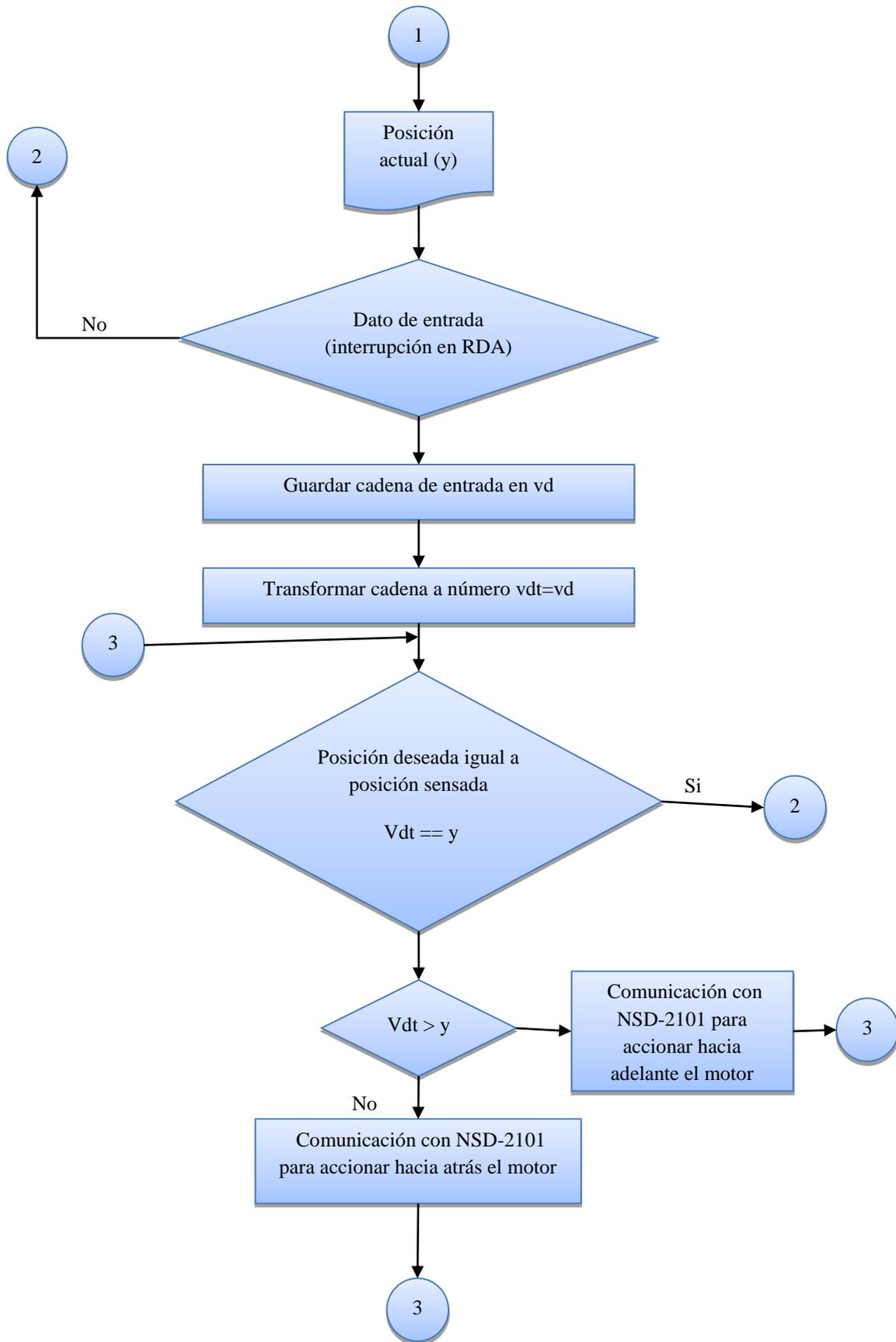
```

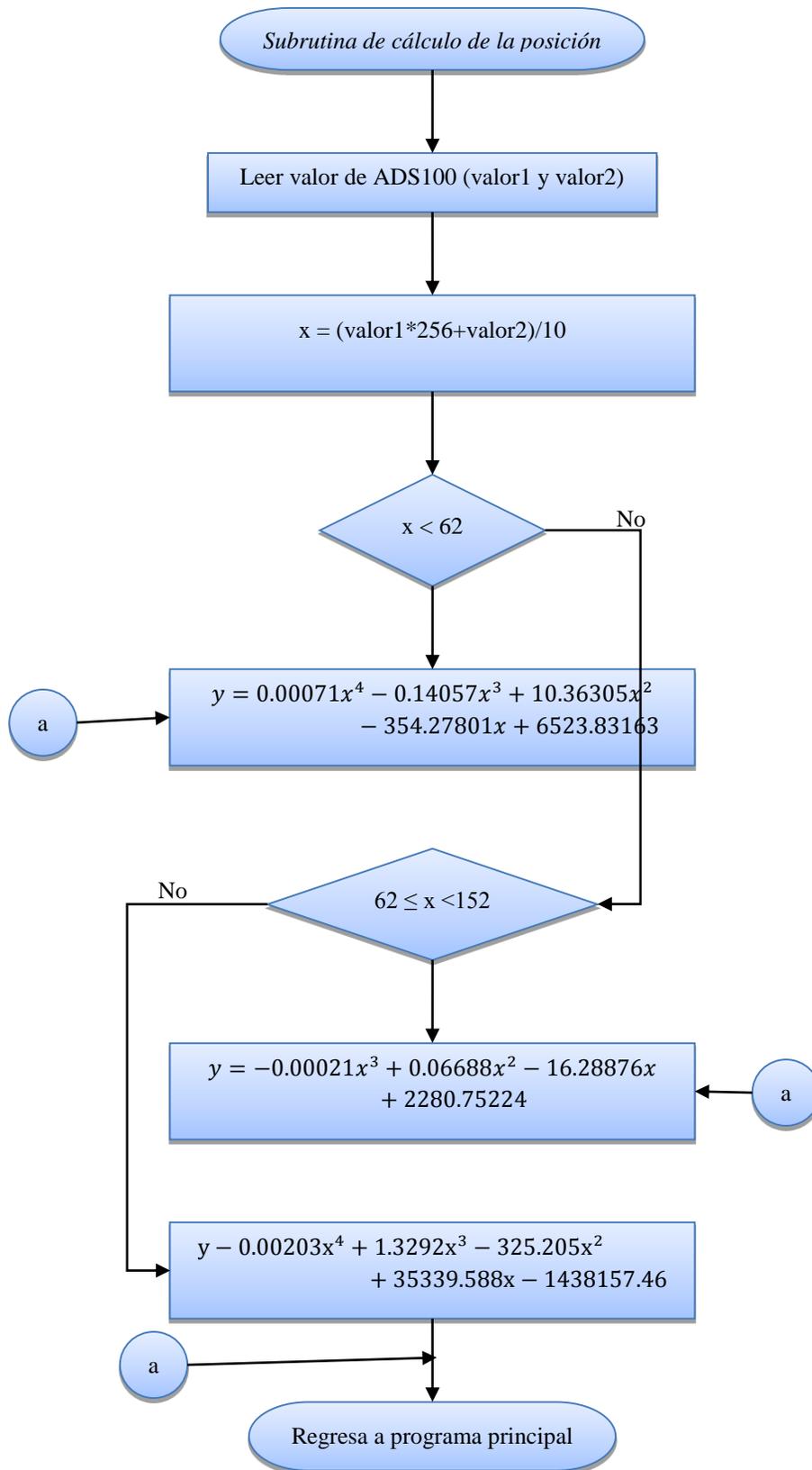
p3=polyfit(adc3,dist3,4);
pp3=polyval(p3,adc3)
hold on
plot(adc3,pp3,'g','linewidth',2);
p3(1);
p3(2);
p3(3);
p3(4);
p3(5);
fprintf(1,'%6.8f\n',p3(1));
fprintf(1,'%6.8f\n',p3(2));
fprintf(1,'%6.8f\n',p3(3));
fprintf(1,'%6.8f\n',p3(4));
fprintf(1,'%6.8f\n',p3(5));

```

A.2 Diagrama de flujo del algoritmo de control para el *microdrive*







A.3 Código para la programación del microcontrolador

```
#include <16F726.h>
#include<stdlib.h>      //libreria para convertir de cadenas a números
#fuses NOWDT, NOBROWNOUT, INTRC_IO//, MCLR
#use delay (INTERNAL=16M)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,stream=bits=8)
#use i2c(MASTER, SDA=PIN_C4, SCL=PIN_C3,fast,/*FORCE_HW*/)

char vd[8];
int16 Periodcounter=0x01;
float32 vdt,y,x,valor1,valor2;

void ecuacion()
{
    i2c_start();
    i2c_write(0b10010001);    //dirección del ADS1000 leer
    valor1=i2c_read();
    valor2=i2c_read();
    i2c_stop();
    x = (valor1*256+valor2)/10;    //multiplicamos por 256 para hacer la parte más significativa y dividimos
    entre 10 para hacer más grandes los coeficientes en la regresión

    if(x<62)
    //intervalo de 611-275
        y=0.00071641*(x*x*x*x*x)-0.14057574*(x*x*x*x)+10.36305689*(x*x*x)-
        354.27801908*x+6523.83163342;

        else if((x>=62)&&(x<152))
    //intervalo de 1529 a 611
        y=-0.00021994*(x*x*x*x)+0.06688226*(x*x*x)-16.28876762*x+2280.75224242;

    else
    //intervalo de 1802 a 1529 primer polinomio
        y=-0.00203693*(x*x*x*x*x)+1.32922208*(x*x*x*x)-325.20594624*(x*x*x)+35339.58831724*x-
        1438157.46949993;

        printf("%5.5f",y);
        printf("\n");
}

#int_RDA
void datinrs232()
{
    gets(vd);
}
```

```

puts(vd);
vdt=atof(vd);
output_low(PIN_D1);
//for(ciclos=0;ciclos<=pulsos2;ciclos++)
//*****baja*****
while(vdt>y)
//if(input(PIN_C0))
    {

        i2c_start();          //condicion de inicio
        i2c_write(0xa8);
        i2c_write(0x02);
        i2c_write(0b00000000);
        //i2c_write(0b01000000);
        i2c_write(0b01000000);
        i2c_stop();
        output_high(PIN_D0);
        ecuacion();
    }

//*****sube*****

while(vdt<y)
//if(input(PIN_C1))
    {

        i2c_start();          //condicion de inicio
        i2c_write(0xa8);
        i2c_write(0x02);
        i2c_write(0b01000000);
        //i2c_write(0b01000000);
        i2c_write(0b01000000);
        i2c_stop();
        output_high(PIN_D0);
        ecuacion();
    }
}

void main(void)
{
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts (GLOBAL);
    i2c_start();
    i2c_write(0xa8);
    i2c_write(Periodcounter);
    i2c_write(146);
}

```

```

i2c_stop();

//activamos el control de velocidad hibrido en el registro PeriodOffset
i2c_start();
i2c_write(0xa8);
i2c_write(0x06);
i2c_write(0b00100000);
i2c_stop();

//hibrid Speed
i2c_start();
i2c_write(0xa8);
i2c_write(0x07);
//dos=i2c_write(velhibri);
i2c_write(127);
i2c_stop();

while(1)
{
output_high(PIN_D1);
output_low(PIN_D0);
ecuacion();

}
}

```

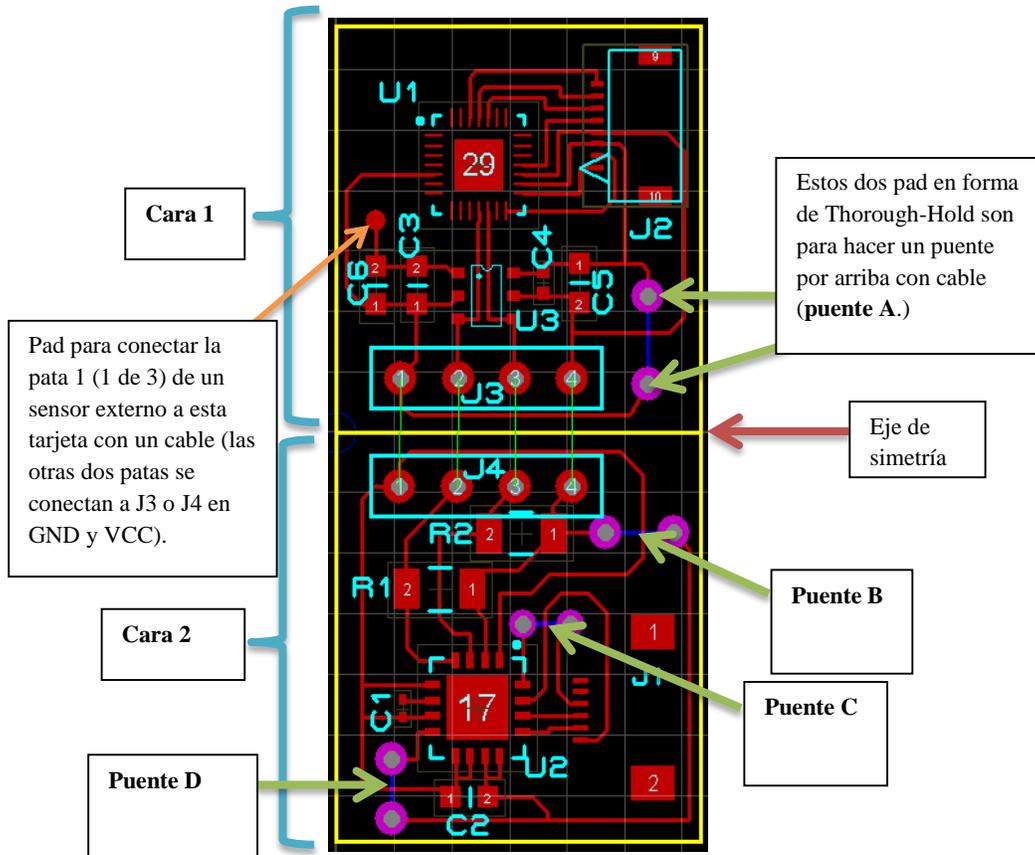
A4. Diseño de tarjeta electrónica

La tarjeta está diseñada para ser de una sola cara, sin embargo al final es una tarjeta doble cara. La tarjeta está dividida en cara1 y cara 2 las cuales se interconectan por medio de cables o pines-headers gracias a que J3 y J4 son simétricos respecto a un eje de simetría (ver imagen de abajo). Es decir los únicos barrenos coincidentes son los de J3 y J4 como se ve en la figura de abajo.

En la imagen también se observan pads en forma de Thorough-Hold marcados en color rosa con gris (los cuales pueden ser barrenos no pasados o dejar sin barrenar), ellos permiten hacer puentes por arriba de algunas “pistas”, es decir en el lugar de las pistas marcadas en azul habrá cables, de la misma manera se trata los puentes A, B, C y D.

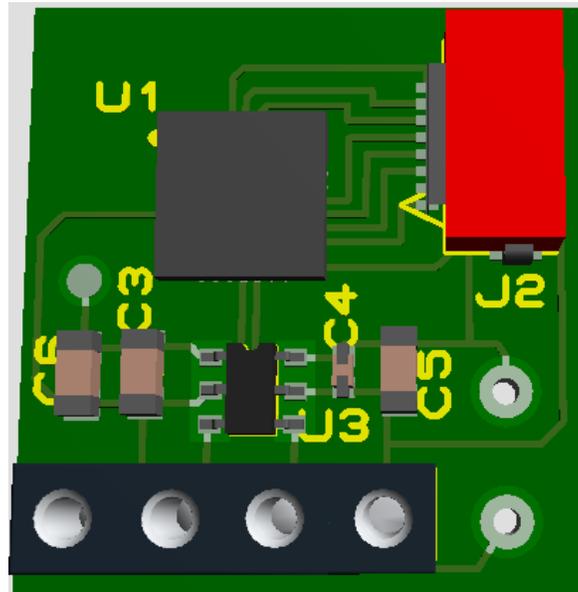
En la parte izquierda de la figura, arriba del capacitor C6 se ubica un pad circular (sin barreno), en él no se monta ningún componente ya que este sirve para conectar uno de los

tres pines de un sensor externo a la tarjeta, esto es, el sensor se fija en otra parte y se conecta a la tarjeta por cables, los otros dos pines se conectan a J3 o J4 en GND y VCC respectivamente.



Diseño final:

Cara 1



Cara 2 (No se ve el conector J1 pero si debe estar soldado)

