

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física



Diseño e implementación de un sistema de movimiento preciso de la punta y/o muestra para su uso en Microscopios de Proximidad (SPM)

Trabajo Especial de Grado presentado por
Ronald Ramón Tovar Cordero
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: Licenciado en Física
Bajo la tutoría de: Dr. Humberto Rojas.

Abril- 2016
Caracas - Venezuela.

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física



**Diseño e implementación de un sistema de movimiento preciso de
la punta y/o muestra para su uso en Microscopios de Proximidad
(SPM)**

Trabajo Especial de Grado presentado por
Ronald Ramón Tovar Cordero
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: Licenciado en Física
Bajo la tutoría de: Dr. Humberto Rojas.

Abril – 2016
Caracas – Venezuela.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



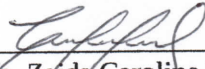
VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por **Ronald Ramón Tovar Cordero**, Cédula de Identidad **V-18758870**, bajo el título **“Diseño e implementación de un sistema de movimiento preciso de la punta y/o muestra para su uso en Microscopios de Proximidad (SPM)”**, a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **Licenciado en Física**, dejan constancia de lo siguiente:

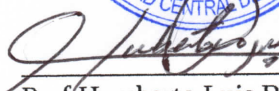
1. Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día 30 de mayo de 2016, a las 2:00 pm, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de Seminarios Guillermo Ruggeri de la Escuela de Física, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado; todo ello conforme a los artículos 20, 21, 22, 25, 26 y 28 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente.
2. Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió declararlo aprobado por considerar que se ajusta a lo dispuesto y exigido en la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente en sus artículos 1, 5 y 6.

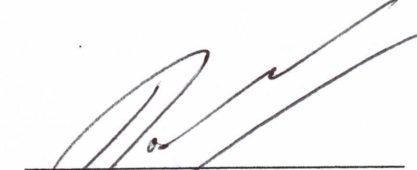
Se levanta la presente acta a los 30 días del mes de mayo de 2016, dejándose también constancia de que, conforme a la normativa jurídica vigente, actuó como coordinador del jurado el tutor del Trabajo Especial de Grado Prof Humberto Luis Rojas Mujica.

Firma del jurado evaluador


Prof. Zaida Carolina Medina
de Hoenicka
V-16497888
UCV




Prof Humberto Luis Rojas
Mujica
V-6821576
UCV


Prof Carlos Eduardo Rojas
Gutiérrez
V-3968295
UCV

RESUMEN

En el presente trabajo se implementó parcialmente un sistema de posicionamiento preciso de la punta y/o muestra basado en el control del movimiento de piezoactuadores con la finalidad de ser utilizado en un futuro para aplicaciones de microscopia de proximidad. Para ello se utilizó un piezocontrolador MTD693 que permite alimentar dichos piezoactuadores. El MTD693 fue comandado mediante una placa de hardware Arduino capaz de controlar y suministrar un voltaje a su entrada de voltaje externo. La programación del Arduino se basó en el lenguaje C/C++ y se trabajó en su propio entorno de desarrollo o IDE, con el cual se logró activar las salidas tipo PWM y generar una señal pseudo - analógica que luego fue tratada con un circuito externo con el fin de convertirla en una “verdaderamente” analógica. Las limitantes de resolución de las salidas PWM del Arduino, 8 bits de resolución por defecto equivalente a 256 estados, fueron superadas mediante el uso de la librería TIMERONE, la cual permite habilitar 16 bits de resolución, logrando obtener un máximo de 65.536 estados. Esto permitió obtener variaciones de voltaje más finas y así obtener mayores resoluciones en el voltaje de salida y por ende, en el desplazamiento generado por los piezoeléctricos. En la presente investigación se estableció como meta alcanzar una resolución límite de 1024 estados. La interacción entre el usuario y el dispositivo se hizo a través del computador utilizando una interfaz gráfica desarrollada en el entorno de programación Visual Studio 6 en lenguaje Visual Basic. Esta interfaz nos permite seleccionar la resolución, la frecuencia de movimiento y el máximo voltaje de salida, una vez seleccionadas y enviadas al Arduino, simula el recorrido hecho por el movimiento de los piezoeléctricos.

Índice

CAPÍTULO 1	1
<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
CAPÍTULO 2	3
<i>SISTEMAS SPM, SUS COMPONENTES Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO</i>	3
2.1.- <i>Los Microscopios de Proximidad (SPM)</i>	3
2.2.- <i>Piezoeléctricos</i>	4
2.3.- <i>Sistema de Control PID</i>	8
2.4.- <i>Protección contra las vibraciones</i>	9
2.5.- <i>Protección contra las ondas acústicas</i>	11
2.6.- <i>Protección contra los cambios de temperatura</i>	11
2.7.- <i>Ejemplos de sistemas SPM</i>	12
2.7.1.- Microscopio de efecto túnel	12
2.7.2.- Microscopio de Fuerza Atómica	14
2.8.- <i>Modos de funcionamiento del AFM</i>	17
CAPÍTULO 3	18
<i>EL SISTEMA DE DESARROLLO ARDUINO Y EL PIEZOCONTROLADOR MDT693</i>	18
3.1.- <i>Sistema de desarrollo Arduino</i>	18
3.2.- <i>Salidas analógicas y Modulación de Ancho de Pulso</i>	20
3.3.- <i>Programación en lenguaje Arduino</i>	22
3.4.- <i>Controlador de piezoeléctricos (MDT693)</i>	23
CAPÍTULO 4	26
<i>DESARROLLO EXPERIMENTAL</i>	26
4.1.- <i>Programa principal de control</i>	26
4.1.1.- Primera etapa o inicio	28
4.1.2.- Segunda etapa, elección del voltaje máximo de salida	29
4.1.3.- Tercera etapa, designación del periodo de la señal	29
4.1.4.- Cuarta etapa, elección de la resolución	30
4.2.- <i>Circuito externo para generación de voltaje analógico</i>	32
4.2.1.- Filtro RC	32
4.2.2.- Circuito seguidor de tensión	33
4.2.3.- Circuito amplificador de voltaje	33
4.2.4.- Multiplexores y divisores de tensión	34

4.3.- <i>Medición de elongación en función de voltaje</i>	38
4.4.- <i>Interfaz gráfica programa en Visual Basic 6.0</i>	40
CAPÍTULO 5	42
<i>RESULTADOS Y DISCUSIONES</i>	42
5.1.- <i>Interfaz gráfica para el control de voltajes de salida</i>	42
5.2.- <i>Evaluación de la elongación del piezoeléctrico</i>	44
CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56

CAPÍTULO 1

Introducción

En los últimos 35 años se han desarrollado una serie de técnicas de microscopía llamadas Microscopía de Proximidad (o SPM del inglés Scanning Probe Microscopy), las cuales se basan en la detección y control de los distintos tipos de interacción existentes entre una punta muy delgada y una muestra. Estas interacciones son observadas en la escala nanométrica, por lo cual se necesitan sistemas de movimiento muy precisos que ofrezcan altas resoluciones en el posicionamiento del sistema punta-muestra.

En general toda la microscopia de proximidad se construye midiendo alguna de las interacciones existentes entre la punta y la muestra que sean dependientes de la distancia que las separa. Como ejemplo, se podría decir que si la interacción seleccionada genera cambios en la corriente que circula entre ambos componentes, ésta pasaría a ser la variable de control y de la información recolectada de los cambios producidos en ella, se genera una señal que puede ser convertida digitalmente en una imagen que reproducirá la topografía de la muestra. Tal es el caso del microscopio de efecto túnel, inventado en el año 1981 por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer y que constituye el primer miembro de la familia de las técnicas SPM (G. Binnig, 1982). El descubrimiento y desarrollo de estas técnicas ha logrado impulsar el avance de la nanotecnología como disciplina científica, en la cual se ha llegado a la manipulación de pocos átomos.

En los sistemas SPM, los movimientos precisos de la distancia punta-muestra, así como también del desplazamiento lateral de la punta (o muestra) son controlados por instrumentos electrónicos manejados con el uso de microcontroladores capaces de realizar tareas programadas sin una supervisión humana constante, constituyéndose el conjunto en un sistema de control automático.

Los sistemas de control automático resultan de vital importancia en la vida cotidiana actual, debido a las distintas tecnologías que los aplican. Estos usos pueden ir desde lo más básico como lograr el encendido y apagado de una luz de manera programada, hasta sistemas complejos capaces de fabricar cosas de manera autónoma (Kuo, 1996).

En el diseño y construcción de un sistema de control automático, la elección del microcontrolador de acuerdo a sus características y capacidades es de suma importancia. En la actualidad la gama Arduino, una placa de hardware libre reprogramable, representa una estupenda opción, ya que logra combinar una excelente capacidad de procesamiento con un bajo costo y acceso a software libre.

En el presente trabajo se describe el proceso de diseño e implementación de un sistema de control capaz de automatizar el movimiento de actuadores piezoeléctricos para su uso en sistemas SPM. Para ello se utilizó un piezocontrolador MDT693, el cual a su vez fue manejado mediante un dispositivo Arduino a través de un programa de computador basado en el lenguaje C/C++.

El presente trabajo está estructurado de la manera siguiente. En el capítulo 2 se hace una breve descripción de los componentes principales de un SPM haciendo énfasis en los piezoeléctricos y los sistemas de control PID. Por otra parte, se hacen recomendaciones acerca de las distintas precauciones a tomar en el momento de diseñar un SPM y se hace una pequeña presentación de los tipos de microscopios de efecto túnel y el de fuerza atómica. En el capítulo 3 se presenta la placa de hardware libre Arduino UNO y el piezocontrolador MDT693 y se muestran sus características principales tanto externas como de funcionamiento. En el caso del Arduino UNO se expone además, la forma de programación dentro de su entorno particular y se definen y explican las propiedades de la señal PWM. En el capítulo 4 se muestra la metodología para la elaboración de los programas utilizados, las partes y funcionamiento del circuito externo así como también el procedimiento usado para hacer las medidas de las diferentes elongaciones con un interferómetro de espectroscopía de luz blanca. En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios en esta área.

CAPÍTULO 2

Sistemas SPM, sus componentes y principios de funcionamiento

En este capítulo se describen los componentes principales de un sistema SPM y los principios físicos en los cuales de basa su funcionamiento, haciendo énfasis especial en los elementos piezoeléctricos y sus propiedades. También, se describen los sistemas de control PID y se dan aspectos fundamentales a tener en cuenta en el momento de diseñar un SPM, por último se presentan brevemente dos tipos de SPM como lo son los microscopios de efecto túnel (STM del inglés Scanning Tunneling Microscope) y de fuerza atómica (AFM del inglés Atomic Force Microscope).

2.1.- Los Microscopios de Proximidad (SPM)

El funcionamiento de los SPM se basa en las interacciones atómicas existentes entre una punta y una muestra (interacciones eléctricas, magnéticas, de efecto túnel), dependiendo de la interacción medida el fundamento teórico para la creación del aparato será diferente, aunque en general se puede esquematizar un SPM como en la Figura. 2.1.

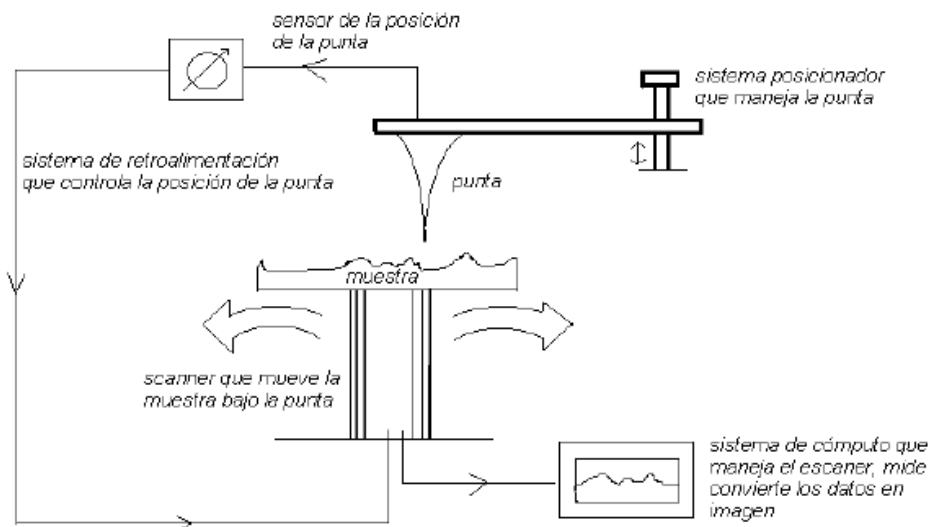


Figura. 2.1. Esquema general de un SPM. (Veeco Instruments Inc., 2005).

Al sondear la muestra con la punta, dicha punta experimenta fuerzas debido a las interacciones existentes entre ambas, este sondeo se puede hacer moviendo la base y por lo tanto se coloca un scanner que mueve la muestra bajo la punta, en general se busca medir una interacción que dependa de la separación entre la punta y la muestra y por medio de un sistema de control con retroalimentación se pueda controlar la posición de la punta y como consecuencia la distancia entre ellas.

Cada cambio en su distancia relativa es recibido por un sistema de cómputo en forma de voltaje y esos datos son convertidos en imágenes.

Se puede decir que los elementos fundamentales de un SPM son la punta y el scanner, los cuales requieren para el control de su movimiento sistemas de movimiento preciso.

2.2.- Piezoeléctricos

Para lograr el movimiento preciso de la punta y/o muestra es muy común, debido a su gran versatilidad y facilidad de uso, la utilización de dispositivos basados en piezoeléctricos, los cuales tienen la capacidad de modificar sus dimensiones espaciales con la aplicación de un campo eléctrico externo. Dependiendo de cómo sean las direcciones de la polarización del piezoeléctrico y del campo eléctrico, la dirección de la deformación cambiará (ver Figura 2.2.), y esta se puede expresar con el siguiente tensor:

$$U_{ij} = d_{ijk} E_k \quad \text{Ecuación. 2.1}$$

Donde U_{ij} es el tensor de deformación, d_{ijk} es el tensor piezoeléctrico y E_k son las componentes del campo eléctrico externo (Mironov, 2004).

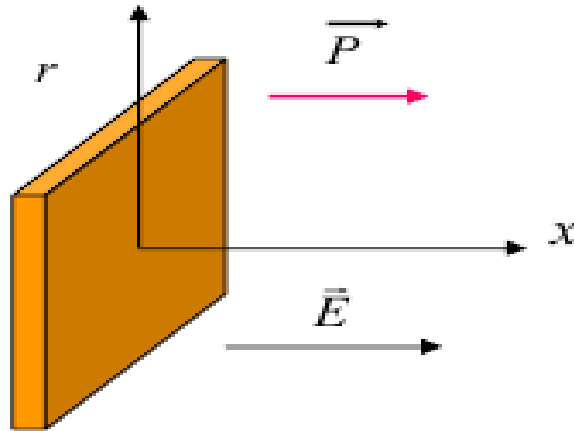


Figura 2.2. Segmento piezoeléctrico con polarización en el mismo sentido del campo eléctrico aplicado (Mironov, 2004).

En el momento de trabajar con este tipo de dispositivos se tiene que tomar en cuenta que no son perfectos y que presentan varios efectos causantes de anomalías, como lo son la no-linealidad, el retraso temporal existente entre la aplicación del voltaje y la reacción del piezoeléctrico, así como la histéresis presente en su función de transferencia.

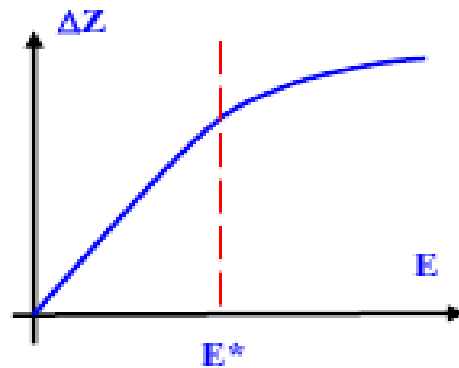


Figura 2.3. Gráfica de la elongación (ΔZ) en función del campo eléctrico externo aplicado (E) (Mironov, 2004).

A medida que el campo eléctrico es mayor, la elongación del piezoeléctrico deja de ser totalmente proporcional al campo eléctrico externo, por lo que deja de ser lineal como se puede ver en la Figura 2.3.

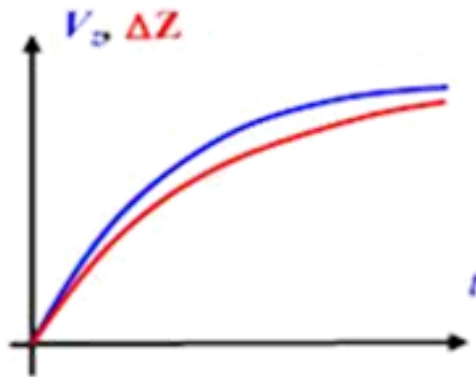


Figura 2.4. Gráfica de voltaje V_z (azul), elongación ΔZ (rojo) en función del tiempo (Mironov, 2004).

En la figura 2.4 se muestra cómo es el comportamiento temporal de la elongación a medida que aumenta el voltaje en el mismo intervalo de tiempo; a medida que el voltaje aumenta la reacción del piezoeléctrico se vuelve más lenta.

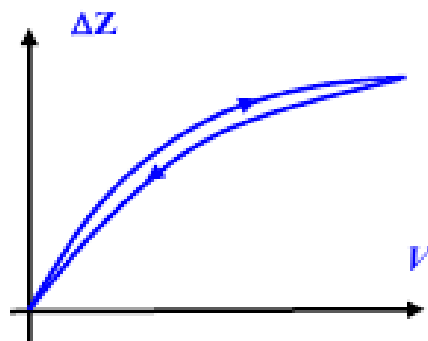


Figura 2.5. Curva de histéresis de un piezoeléctrico (Mironov, 2004).

La figura 2.5 muestra la curva de histéresis de un piezoeléctrico, se puede notar claramente que las elongaciones cuando el voltaje aumenta no se corresponden con la observada cuando el voltaje es disminuido y esto es un punto de vital importancia a considerar en el momento de generar movimientos periódicos del piezoeléctrico.

Dependiendo de su aplicación existen varios tipos de arreglos de piezoeléctricos que podrían resultar convenientes, como lo son el tubular, el piezoscanner tubular y la celda bimorfa que se muestran en las Figuras 2.6., 2.7. y 2.8 respectivamente.

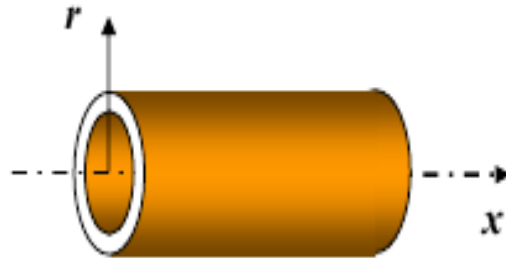


Figura 2.6. Arreglo piezoeléctrico tubular (Mironov, 2004).

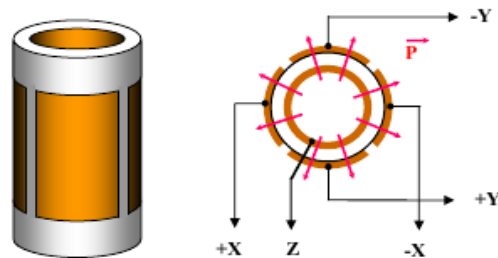


Figura 2.7 Piezoscannertubular (Mironov, 2004).

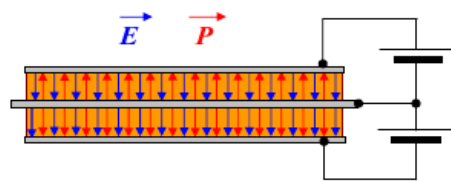


Figura 2.8. Celda bimorfa (Mironov, 2004).

Usando estos arreglos se pueden crear combinaciones con las cuales se puede mover la punta y/o muestra y así lograr movimientos independientes en cada uno de los ejes de coordenadas (XYZ), por lo que pueden generar movimientos de torsión.

2.3.- Sistema de Control PID

El sistema de control tiene como función mantener el valor de una variable determinada del proceso cerca de un punto o valor de referencia. Esto se logra con un lazo de retroalimentación o feedback, generando así un monitoreo dinámico.

En los microscopios SPM es común que la acción de control se realice con un sistema de tres acciones: una proporcional, una integral y una diferencial (PID). En este tipo de estructura de control se tienen las bondades unidas de cada una de las acciones por separado.

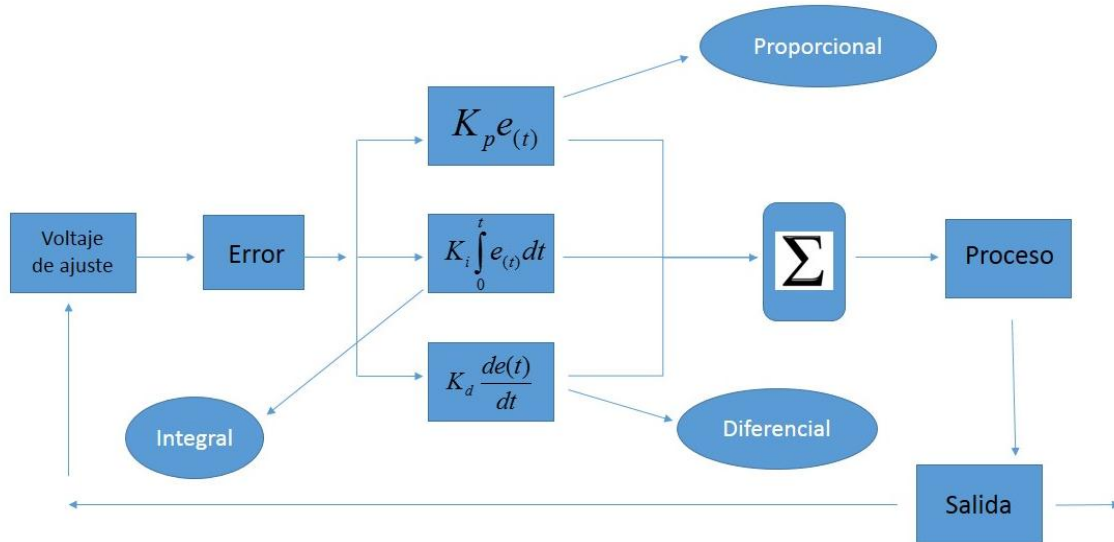


Figura 2.9. Esquema general de un sistema de control PID (Proporcional, Integral y Diferencial).

La función de estado de un PID se puede expresar de la siguiente manera:

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)} + K_i \int e_{(t)} dt + K_d \frac{d}{dt} e_{(t)} \quad \text{Ecuación. 2.2}$$

Donde, K_p , K_i y K_d representan constantes y $e_{(t)}$ es el error dependiente del tiempo.

Cada uno de estos términos de la ecuación 2.2. aplica una acción diferente a la señal, el primero de ellos es la acción proporcional que mide la diferencia entre el valor actual de la señal y la referencia establecida. El segundo término es el término integral y se refiere al tiempo que se tarda en aplicar la acción, mientras más pequeño sea el valor más rápido se puede hacer la corrección. Por último, tenemos el término diferencial, el cual realiza una acción predictiva ya que actúa dependiendo del cambio del error y produce una corrección brusca antes que el valor del error sea demasiado grande.

Debido a que las escalas de movimientos de los piezoeléctricos están en escala nanométrica, e incluso a escalas cercanas a los 0,1 Ångstrom, las medidas son altamente susceptibles a errores y alteraciones ocasionados por factores externos, por lo cual, hay que intentar aislar el sistema en contra de estas fuentes de errores potenciales, a continuación se explican algunas medidas que se pueden tomar a fin de minimizar estos problemas.

2.4.- Protección contra las vibraciones

Cualquier vibración existente en el ambiente de medida puede alterar la distancia existente entre la punta y la muestra, lo que generaría una medida errónea de la interacción controlada. Una manera de disminuir este inconveniente es con el uso de un *Sistema Pasivo de Aislamiento a Vibraciones*, el cual consiste, por ejemplo, en colgar todo el sistema del microscopio en un resorte (ver figura 2.10), lo cual generará que la respuesta ante perturbación externa sea solamente apreciable siempre y cuando la frecuencia con que se realice la perturbación sea muy próxima a la del sistema masa-resorte construido (Mironov, 2004).

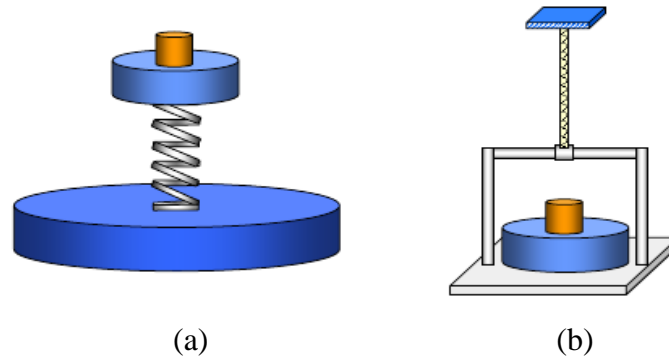


Figura 2.10. Sistemas Pasivos de Aislamiento a Vibraciones (a) plataforma elástica, (b) sistema de suspensión elástica (Mironov, 2004).

También se pueden utilizar *Sistemas Activos de Aislamiento a Vibraciones* (ver figura 2.11) los cuales tratan de compensar cualquier cambio en la inclinación del microscopio utilizando piezoeléctricos con un sistema de retroalimentación controlados con un PID con gran componente diferencial, ya que intenta predecir el movimiento de todo el instrumento.

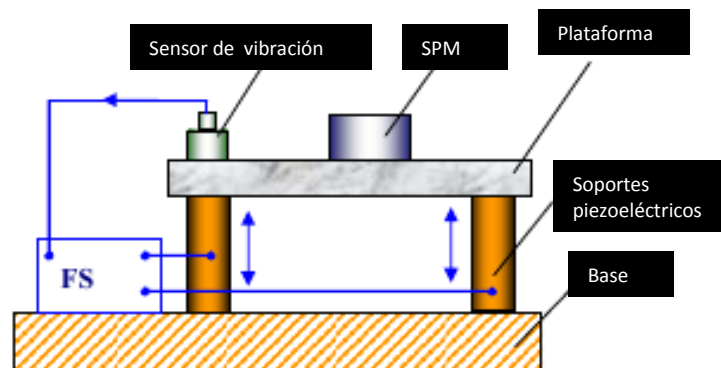


Figura 2.11. Sistema activo de aislamiento a vibraciones (Mironov, 2004).

2.5.- Protección contra las ondas acústicas

Las ondas acústicas son de naturaleza mecánica y al chocar con la muestra o los componentes del microscopio SPM pueden generar movimientos indeseados. Para contrarrestar esto, lo ideal es usar el microscopio en una cámara de vacío como se muestra en la figura 2.12 pero a fines prácticos se pueden conseguir muy buenos resultados colocando el microscopio dentro de un contenedor construido con materiales que atenúan las ondas sonoras como lo son el corcho y el anime. Estos son muy adecuados ya que debido a su estructura contiene muchos espacios llenos de aire y el cambio frecuente en el medio de transmisión de la onda genera su rápido decaimiento.

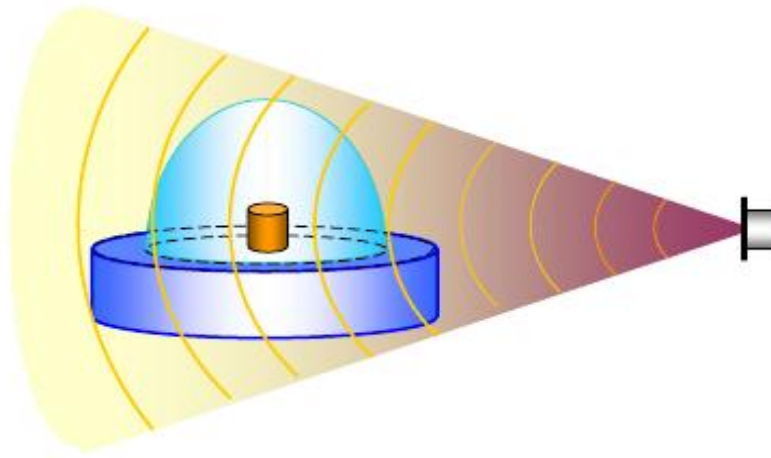


Figura 2.12. Sistema de aislamiento a ondas sonoras (Mironov, 2004).

2.6.- Protección contra los cambios de temperatura

Al variar la temperatura los materiales experimentan variaciones en sus tamaños y dichas variaciones dependerán de su coeficiente de dilatación térmica. Si colocamos diversos materiales en la punta, la muestra y en los soportes cada uno responderá de manera diferente a los cambios de temperatura. En el diseño de los SPM se contempla la combinación de los materiales usados de manera tal que se logre la compensación de los coeficientes de dilatación térmica y se puedan disminuir los efectos de la temperatura sobre los movimientos relativos del instrumento. En la figura 2.13b se muestra una configuración que permite la compensación térmica.

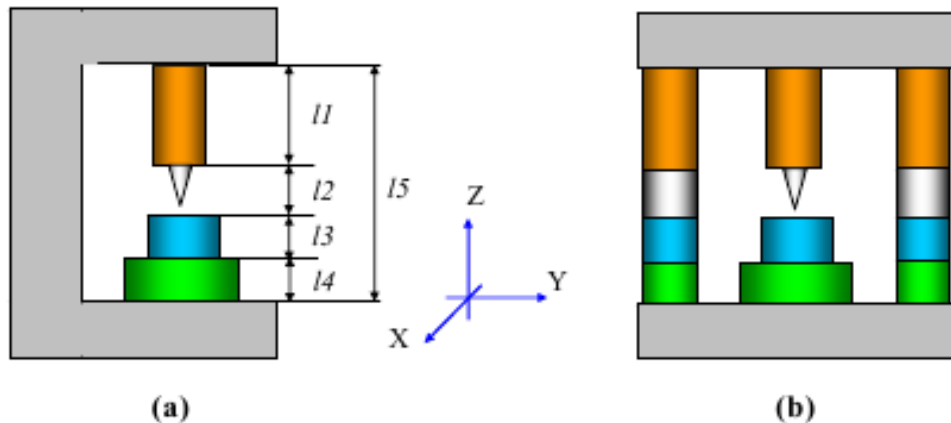


Figura 2.13. (a) Sistema sin compensación, cada color representa un material con diferente coeficiente de dilatación térmica. (b) Sistema con compensación, muestra lo mismo que la fig. 2.13 (a) salvo que los distintos materiales con diferente dilatación térmica también son colocados en los soportes logrando compensar las variaciones en todo el sistema (Mironov, 2004).

2.7.- Ejemplos de sistemas SPM

Los sistemas SPM se clasifican dependiendo del tipo de interacción que se mide entre la punta y la muestra, dentro de los más usados tenemos los microscopios de efecto túnel o STM (del inglés Scanning Tunnel Microscopy) y los microscopios de fuerza atómica o AFM (del inglés Atomic Force Microscopy). A continuación pasaremos a describir brevemente sus principios de funcionamiento.

2.7.1- Microscopio de efecto túnel

En esta clase de SPM, como su nombre lo indica, se mide la corriente de efecto túnel (G. Binnig, 1982) entre la punta y una muestra, ambas conductoras. Dicha corriente depende exponencialmente de la separación “d” entre ambas y cualquier variación en la misma genera un cambio importante en la intensidad de la corriente de túnel (ver figura 2.14).

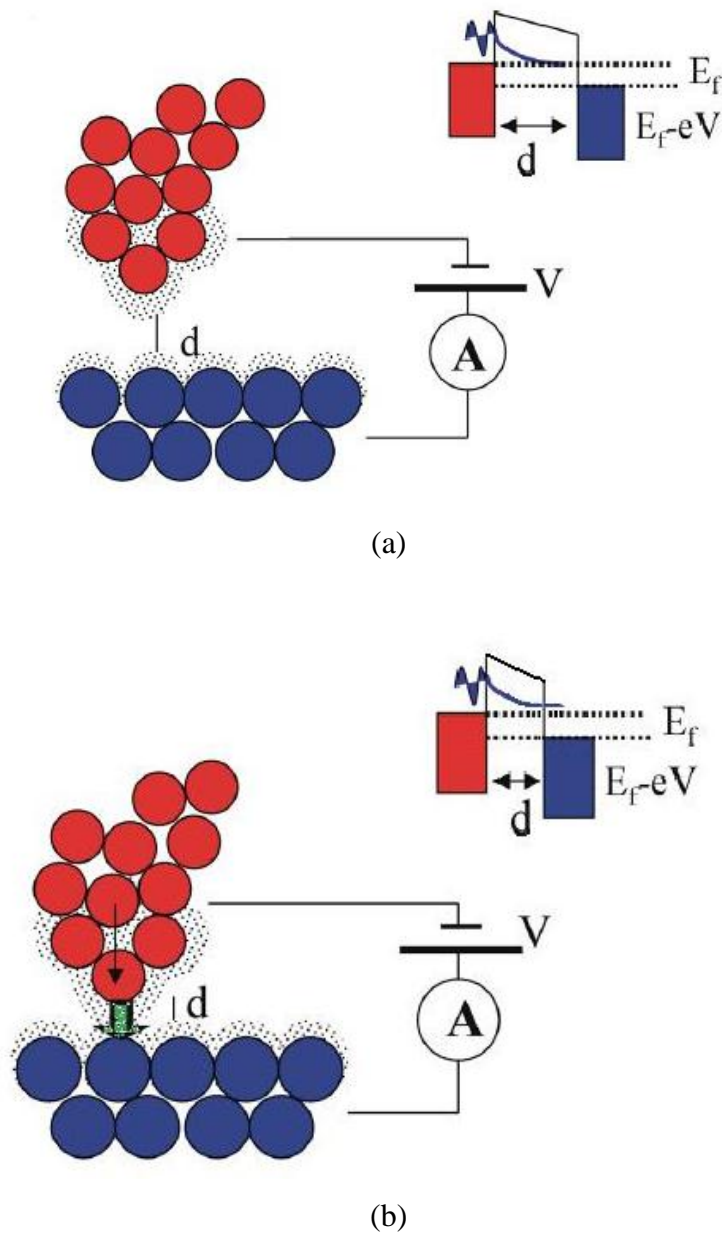


Figura 2.14. Esquema de conducción de electrones a través de una barrera de potencial. (a) distancia punta-muestra d no permite conducción. (b) acercamiento de la punta permite conducción por efecto túnel de electrones a través de la barrera.

Al mantener controlada la corriente mediante un sistema PID se pueden traducir las variaciones en corriente en cambios de separación entre punta y muestra, lo que se puede transformar por medio de un software especializado en una imagen de la topografía de la superficie del objeto en estudio (Veeco Instruments Inc., 2005).

La figura 2.15 muestra un esquema simplificado de cómo está formado un STM.

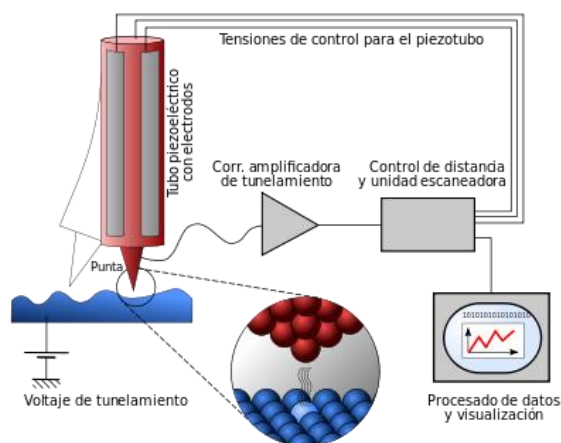


Fig. 2.15. Representación esquemática de un microscopio de efecto túnel (Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>, 2015).

2.7.2.- Microscopio de Fuerza Atómica

Inventado en 1986 por, Gerd Binnig, Calvin F. Quate y Christopher Herber, el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) mide la interacción entre la punta y la muestra a través de la deflexión de un cantilever o brazo (ver Figura 2.16.). En la parte superior de dicho cantilever se coloca una superficie reflectora sobre la cual se hace incidir un láser que cambiará su ángulo de incidencia a medida que se generen torsiones o cambios en la posición del cantiléver. El haz reflejado es detectado por un fotodiodo dividido en 4 cuadrantes. Dependiendo de la porción de la luz que reciba cada cuadrante, se puede determinar la posición de la punta colocada en la parte de abajo del cantiléver. Con esta información se puede determinar la separación en la punta y la muestra (fuerza de interacción constante) y éste constituye el parámetro a ser controlado por el sistema PID.

La información de la separación entre la punta y la muestra como función de la posición XY sobre la superficie permite construir una imagen de manera digital (Peter Eaton, 2010).

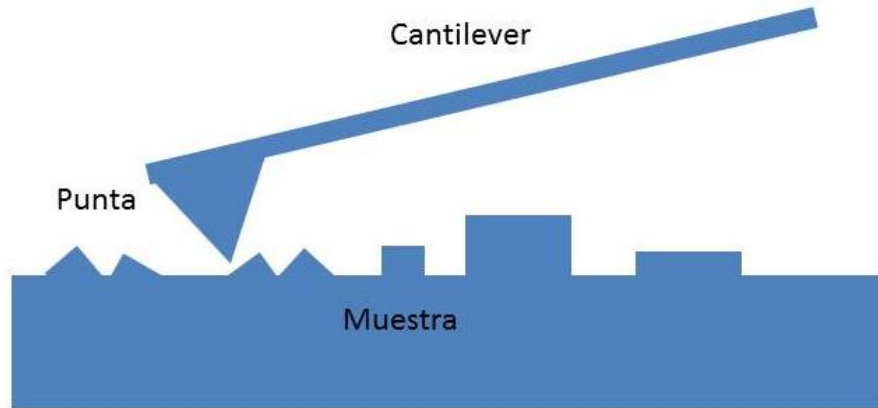


Figura 2.16. Esquema de la ubicación de la punta en el cantiléver y su relación con la muestra a ser analizada.

Dependiendo de la proximidad de la punta a la muestra predominan fuerzas de atracción ó de repulsión. Si es muy cercana, las fuerzas de repulsión de Coulomb predominan, en caso contrario las fuerzas de Vander Waals juegan un papel predominante. La forma cualitativa del potencial asociado a la interacción entre la punta y la muestra o potencial de Lennard-Jones se muestra en la figura 2.17.

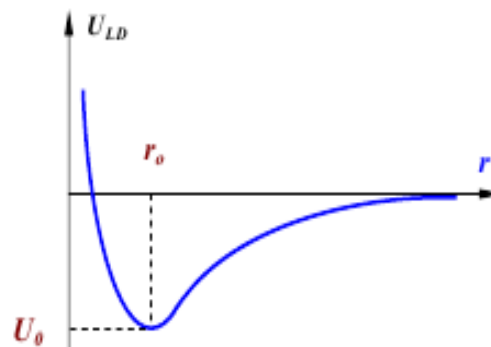


Fig. 2.17. Potencial de Lennard – Jones (Mironov, 2004).

El potencial de Lennard-Jones puede ser descrito mediante la siguiente ecuación:

$$U_{LJ}(r) = U_0 \left\{ -2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

La ecuación 2.3 tiene dos términos, uno negativo que representa la parte atractiva y uno repulsivo que es positivo, nótese que para r grandes predomina el término atractivo ya que el término repulsivo decae más rápidamente (como r^{-12}) y para r pequeñas ocurre lo contrario.

En la Figura 2.18 se muestra un esquema simplificado de un microscopio AFM.

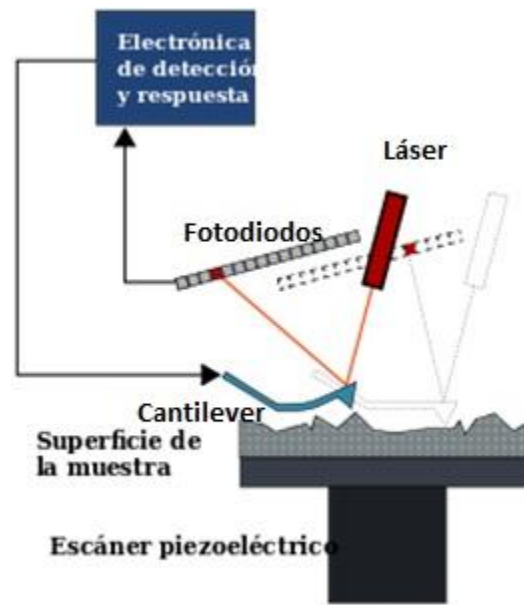


Figura 2.18. Representación esquemática de un microscopio AFM (Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>, 2016).

2.8.- Modos de funcionamiento del AFM

El AFM puede ser operado en distintos modos de funcionamiento en los cuales la punta tiene o no contacto con la muestra. Los modos donde existe contacto se les llama modos de contacto o cuasi estáticos y los modos donde no existe contacto se les llama modos sin contacto. En el caso de existir contacto, la punta toca directamente la muestra y las fuerzas repulsivas existentes entre los átomos de la punta y la muestra contrabalancean las deflexiones del cantilever. Por otro lado en el modo de sin contacto, la punta hace el barrido a una distancia donde dominan las interacciones de tipo repulsivas y/o fuerzas de largo alcance como lo son las magnéticas y electrostáticas.

Existe también el modo de semi-contacto o contacto intermitente, en el que el cantilever se hace oscilar y la punta entra en contacto con la superficie de la muestra para luego retirarse a una distancia donde pasa a ser importante el régimen repulsivo. En este caso, el funcionamiento puede ser explicado mediante un modelo simple de oscilador forzado, donde el cantiléver funciona como un sistema masa-resorte impulsado por un piezoeléctrico y las fuerzas de interacción juegan el papel de una fuerza externa amortiguadora. En este modo se detectan los cambios en la amplitud de la oscilación y la frecuencia en el medio disipativo. La frecuencia con la que es excitado el piezoeléctrico es muy cercana a la frecuencia de resonancia del cantiléver y se intenta mantener oscilaciones pequeñas alrededor de la posición de equilibrio. (Mironov, 2004).

CAPÍTULO 3

El sistema de desarrollo Arduino y el piezocontrolador MDT693

En este capítulo se describe el sistema de desarrollo Arduino y las características de funcionamiento del piezocontrolador MDT693.

3.1.- Sistema de desarrollo Arduino

El sistema de desarrollo Arduino está constituido por una placa de hardware de diseño libre – lo que implica que es de libre uso, de libre estudio, modificación, distribución y redistribución de las mejoras – en la cual se ha colocado un microcontrolador reprogramable con pines de salida o entrada de datos (Ivan González, 2003). Existen varios modelos en el mercado pero en este estudio nos referiremos al estándar llamado Arduino UNO (ver figura 3.1), el cual posee un microcontrolador atmel ATmega328P por lo cual permite contar con salidas digitales y analógicas, 3 Timers para controlar las salidas analógicas y las frecuencias para recibir/enviar datos por medio de la comunicación serial usando el puerto USB o los pines digitales 0 (RX) y 1(TX) así como también es posible el acceso directo a la memoria y controlar directamente su estado.

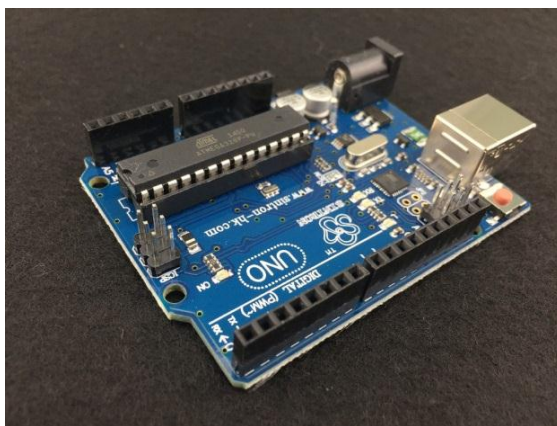


Figura 3.1. Placa Arduino UNO (Aliexpress, 2015).

La tabla 3.1 muestra las características generales de la placa Arduino UNO. De particular interés para el presente trabajo es la existencia de 6 salidas pseudo analógicas PWM (del inglés Pulse Width Modulation). Estas salidas permiten obtener voltajes de salida analógicos mediante la colocación de un circuito externo. Sus características y funcionamiento serán descritas en la siguiente sección.

Tabla 3.1 Características generales de la placa Arduino UNO (Aliexpress, 2015).

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada recomendado	De 7 a 12V
Límites de voltaje de entrada	De 6 a 20V
Pines digitales I/O	14 (6 con salida pseudo analógica PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC de entrada/salida por pin	40mA
Corriente para el pin de 3,3V	50mA
Memoria flash	32Kb
SRAM	2Kb
EEPROM	1Kb
Velocidad del reloj (clockspeed)	16Mhz

La figura 3.2 muestra los distintos componentes de la placa Arduino Uno. Es importante señalar que no siempre están dispuestos exactamente de la misma manera, la figura muestra uno de los modelos más comunes.

El Arduino resulta una opción adecuada para realizar operaciones autónomas bien sea como actuador, a través de motores, luces u otros o como controlador, recibiendo información de sensores externos conectados a sus entradas analógicas.

Una de las principales ventajas del sistema es la compatibilidad con gran parte de los sistemas operativos más comunes, Windows, LINUX, Macintosh OSX.

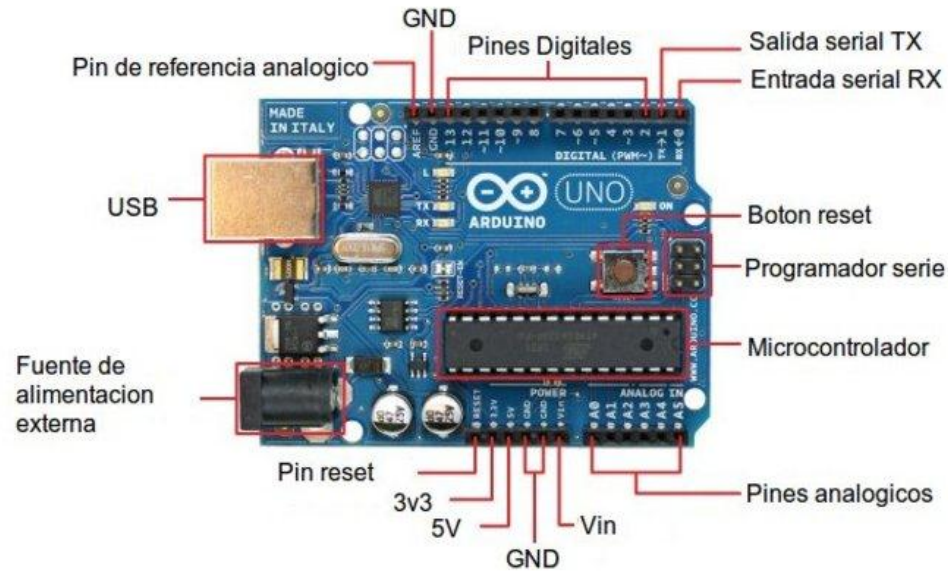


Figura 3.2. Disposición de los componentes en la placa Arduino UNO (Slideshare, 2015).

3.2.- Salidas analógicas y Modulación de Ancho de Pulso

La *Modulación de Ancho de Pulso* o PWM (del inglés Pulse Width Modulation), es un esquema de funcionamiento por medio de la cual logramos simular una salida analógica, también conocida como pseudoanalógica, controlando el ancho de cada pulso de una señal cuadrada de frecuencia constante. Es decir, mientras más cortos sean los pulsos menor será el valor promedio de la señal de salida y mientras más largos, mayor será el valor de dicho promedio (Artero, 2013). Por ejemplo si dura 50% del tiempo en alto (50% en bajo), el promedio será la mitad del voltaje máximo (5 V) entregado por ese pin del Arduino es decir 2,5V.

La placa Arduino UNO está dotada con 6 salidas analógicas (pines PWM) las cuales están identificadas con un símbolo “~” y corresponden a los pines digitales 3, 5, 6, 9, 10 y 11 de la figura 3.2.

Estos pines están controlados por los distintos temporizadores o timers que contiene el ATmega238P y están dispuestos de acuerdo a lo indicado en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Asignación de Timers para salidas PWM del Arduino UNO (Comunidad de Arduino, 2015)

Pines	Timer	Bits
3 y 11	1	16
5 y 6	2	8
9 y 10	3	8

El porcentaje del ciclo de trabajo (DutyCycle) puede ser controlado mediante programación a través de la instrucción `analogWrite()`. Esta instrucción puede tomar como argumento números enteros entre 0 y 255, donde 0 equivale a un DutyCycle de 0% y 255 de 100%.

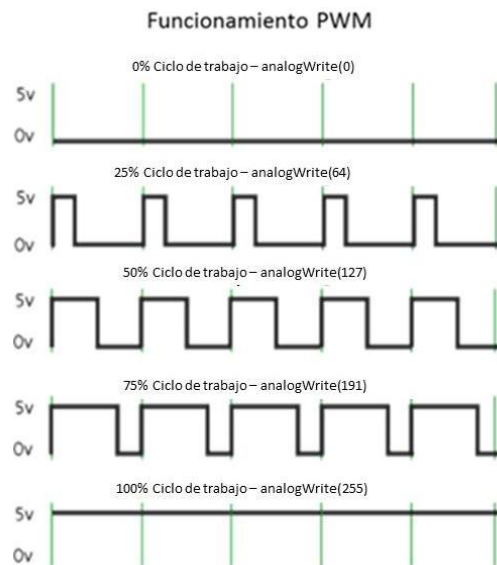


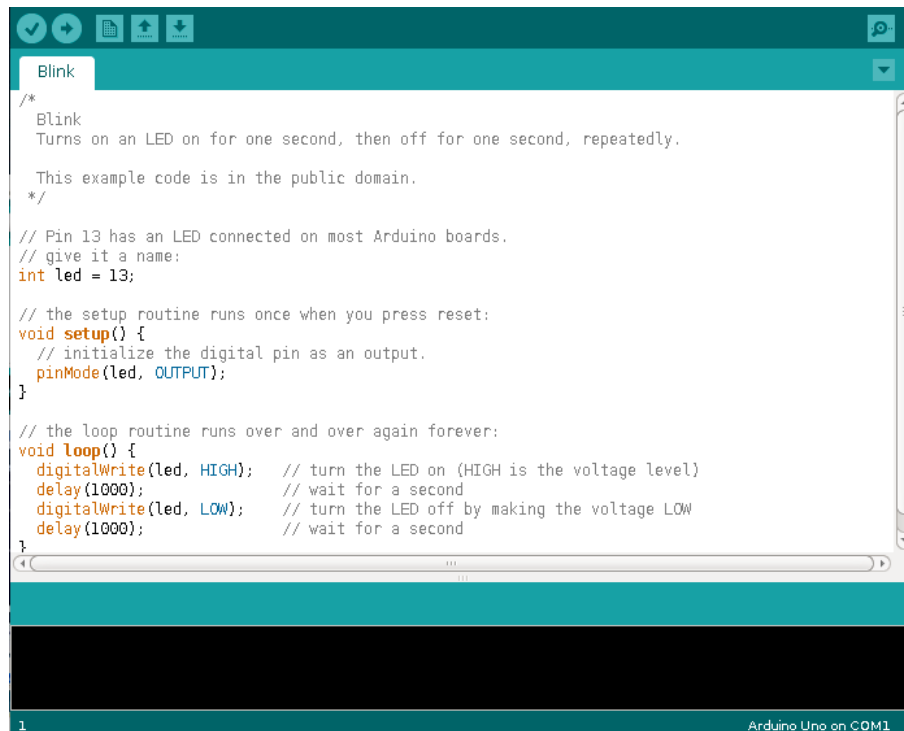
Figura 3.3. Correspondencia entre el ciclo de trabajo (Duty Cycle) y el argumento de la función `analogWrite()` (Comunidad de Arduino, 2015)

En la figura 3.3 las líneas verdes representan un período constante y su duración vendrá dado por el inverso de la frecuencia del PWM, en el caso del Arduino dicha frecuencia es de 500 Hz, por lo tanto el período es de 2 ms.

3.3.- Programación en lenguaje Arduino

El lenguaje de programación de Arduino es de fuente abierta basado en lenguaje C/C++, el cual nos permite escribir instrucciones a ser grabadas posteriormente en la memoria interna del microcontrolador.

El entorno de desarrollo integrado (ver figura 3.4) o IDE (del inglés Integrated Development Environment) de Arduino, permite tener a disposición todas las herramientas necesarias para que los usuarios puedan programar y modificar las instrucciones a ser incorporadas o “subidas” al microcontrolador. En este lenguaje a los programas se le llaman *sketch*.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there is a teal header bar with several icons on the left and a search icon on the right. Below the header, a tab labeled 'Blink' is active. The main area contains C++ code for a blink sketch. The code includes a multi-line comment describing the sketch, a variable declaration for pin 13, a setup function to initialize the pin as an output, and a loop function that toggles the LED on and off with 1000ms delays. At the bottom of the IDE, a status bar shows '1' on the left and 'Arduino Uno on COM1' on the right.

```
/*
 * Blink
 * Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.
 *
 * This example code is in the public domain.
 */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);             // wait for a second
}
```

Figura 3.4. Captura de pantalla del IDE de arduino donde se muestra un ejemplo de *sketch*.

El IDE arduino es multi-plataforma y además proporciona un entorno de desarrollo bastante amigable y agradable, con el cual la programación se realiza de manera intuitiva. Este entorno posee herramientas muy importantes, que permiten la configuración de los parámetros de trabajo necesarios para su buen funcionamiento, como lo son seleccionar el puerto de comunicación, el modelo de Arduino usado, el tipo de programador, entre otros.

Igualmente, posee ejemplos para principiantes y un compilador capaz de detectar posibles errores en el código escrito y la posibilidad de añadir librerías con propósitos específicos.

Otra ventaja existente en el sistema Arduino, es que existen muchísimas comunidades de usuarios que permiten el intercambio de información vía internet y formar a su vez grandes grupos de trabajo (Arduino, Arduino, 2016).

En este trabajo se utilizará la librería TIMERONE, que permite el aumento de la resolución de dos de los pines dotados con salida analógica PWM. A su vez, se activarán los puertos digitales con el fin de habilitar, mediante el uso de multiplexores, alguna salida específica. Los detalles sobre el sistema implementado en el presente trabajo serán explicados y desarrollados a lo largo del siguiente capítulo.

3.4.- Controlador de piezoeléctricos (MDT693)

El MDT693 (ver figuras 3.5 y 3.6) es un dispositivo de alta precisión ideado con la finalidad de controlar el movimiento de piezoactuadores (ver figura 3.7). Debido a sus características de bajo ruido resulta bastante apropiado para el uso en microscopía de alta resolución. El mismo cuenta con tres canales de alto voltaje (hasta 150 V) que pueden ser controlados de manera externa. Esta forma de control es opcional y debido a su alto costo el Laboratorio de Espectroscopía Laser de la Escuela de Química, al cual pertenece el piezocontrolador utilizado en este trabajo de investigación, no adquirió la tarjeta de adquisición de datos vía puerto serial RS232 requerida para su funcionamiento. Por ello, en el presente trabajo se implementó un sistema para lograr la aplicación de voltajes externos usando un conjunto de entradas tipo BNC (ver figura 3.5) destinadas para tal fin.



Figura 3.5. Vista frontal del Piezocontrolador MDT693 THOR LABS. En la imagen se ven los tres canales con sus displays y perillas de control de voltaje interno, así como también las entradas BNC para aplicar voltaje externo en la parte derecha se encuentra la perilla y la entrada BNC para controlar los 3 canales de manera simultánea.



Figura 3.6 Vista trasera del piezocontrolador MDT693 THOR LABS se muestra las salidas de alimentación para los piezoeléctricos (canales X,Y,Z) y la conexión del puerto RS232.



Figura 3.7 Piezoactuador con base móvil de un grado de libertad, tornillo micrométrico y cápsula contentiva del cristal piezoeléctrico.

Cada eje de movimiento (X, Y, Z) puede ser manipulado de manera independiente. El voltaje de salida que controla cada piezoactuador viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{manual} + (15 * V_{ext}) + (15 * V_{RS232})$$

Donde el V_{manual} es el voltaje proporcionado por una fuente interna y es controlado con las perillas identificadas como “int”, esto puede hacerse de manera independiente o todas a la vez usando el master scan, este voltaje generalmente se utiliza para fijar un offset.

El V_{RS232} es para el control de manera remota utilizando el puerto serial RS-232 de un computador, este voltaje es multiplicado por una ganancia de 15 V por cada voltio suministrado, el cual no pudo ser manejado en este trabajo debido a que no se cuenta con la interfaz necesaria para llevarlo a cabo.

El término V_{ext} se refiere al voltaje externo analógico suministrado a través de la entrada BNC y puede variar entre 0 V y 10 V y multiplicado por una ganancia de 15 V por cada voltio suministrado al igual que el V_{RS232} , manteniéndose dentro de este rango se pueden utilizar generadores de funciones con los que se generarían movimientos periódicos en los piezoeléctricos.

El MDT693A también cuenta con un SCAN TRIM, con el cual se puede controlar la ganancia del offset y se puede amplificar desde un 80% a un 120% cada eje de manera independiente o con el SCAN TRIM del MASTER SCAN.

En el presente trabajo se utilizará el control de dos de los ejes por separado manteniendo una referencia fija en el control manual y alimentando el V_{ext} con el sistema formado por el Arduino UNO y la circuitería externa.

CAPÍTULO 4

Desarrollo Experimental

En este capítulo se describe la filosofía y el desarrollo de los programas implementados para la generación de los voltajes analógicos necesarios para el control de los piezoeléctricos a través de controlador MDT693. Igualmente se presentan los circuitos externos desarrollados para conversión de los pulsos PWM en un voltaje analógico.

4.1.- Programa principal de control

El programa principal tiene como finalidad generar las señales necesarias para producir un barrido en forma de raster (ver Figura 4.1.), es decir, un movimiento en el eje x y otro en el eje y, de manera sincronizada, que describan el área correspondiente a la zona de la muestra a ser analizada. Estas señales se construyen de forma discreta o a pasos que pueden ser controlados mediante software y se generan usando contadores de incremento y decremento. Cada vez que el eje y realiza un recorrido completo (ida y vuelta), el eje x solamente aumenta un paso. En el momento que el eje x llega a su máximo recorrido, éste comienza a disminuir hasta llegar al mínimo de manera análoga y sincronizada con el eje y. Estas señales en forma de doble rampa generan los voltajes de salida que alimentarán las entradas V_{ext} del MDT693A.

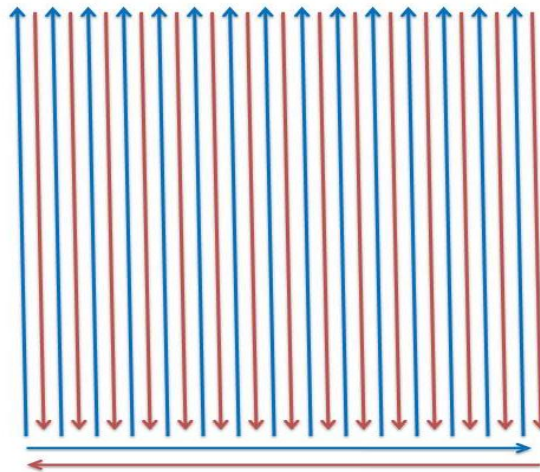


Figura 4.1. Representación de un barrido en forma de raster.

El programa principal permite, a través de una interfaz gráfica diseñada en Visual Basic, modificar la dimensión y resolución del movimiento además del tiempo en que se realiza el mismo. Para controlar la salida PWM del Arduino seleccionada se requiere implementar parámetros externos.

Un requerimiento importante es que la resolución en las rampas de voltaje no debe ser condicionada por el voltaje máximo de salida elegido, es decir, si el voltaje máximo de salida es de 1V, el recorrido será hecho en la misma resolución en pasos que si es hecho a 10V. Esto permite hacer un zoom en el área observada conservando la resolución en número de pasos de la imagen generada (en el caso de imágenes esto equivale a la resolución y número de pixeles). En el programa desarrollado se eligieron las resoluciones de 128x128, 256x256, 512x512 y 1024x1024, ya que son resoluciones estándar de trabajo para la generación de imágenes en las técnicas SPM.

Otro aspecto importante a ser considerado en el sistema de movimiento, y por ende en el programa, es la velocidad con la que se produce el barrido de voltaje. Esto se debe a que esta velocidad determina la velocidad relativa entre la punta y la muestra. Si el recorrido de la punta sobre la muestra se hace a alta velocidad, podrían producirse colisiones no controladas entre ambas debido a que el sistema de retroalimentación del SPM no tendría el tiempo suficiente para procesar los cambios en la interacción. Por ello resulta importante el control del período de la señal que alimenta los piezoeléctricos, en particular el correspondiente al eje “rápido” (en este caso el eje Y). En el presente trabajo este control fue implementado a manera de prueba por no ser el objetivo principal de la propuesta, por lo tanto las medidas del período solamente corresponden a estimaciones.

En el diagrama se muestra el funcionamiento de manera esquematizada.

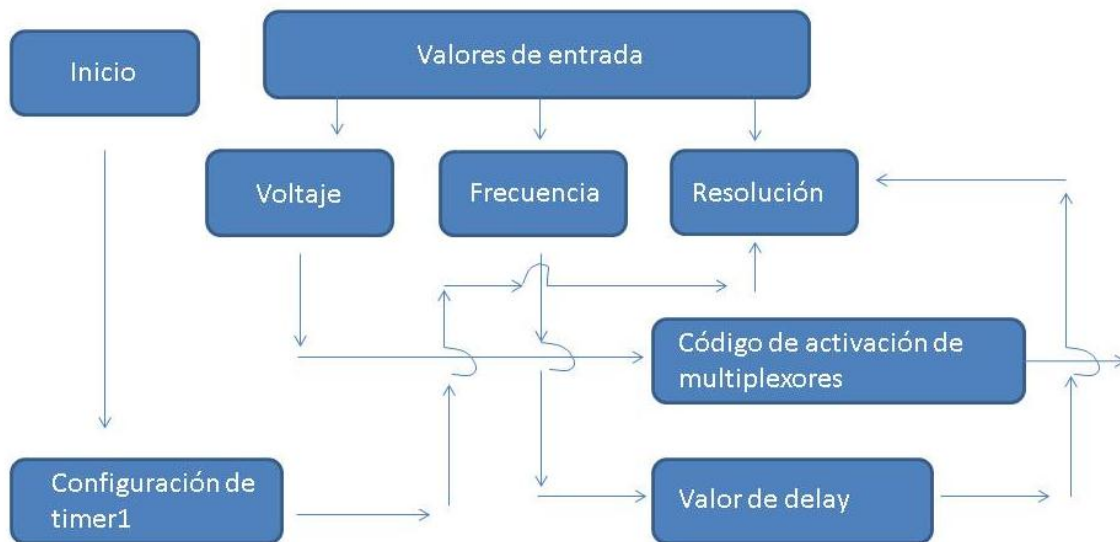


Figura 4.2. Esquema general del programa de control.

A continuación se explica con detalle cada una de las etapas del esquema de la figura 4.1.

4.1.1.- Primera etapa o inicio

Aquí se realiza toda la configuración y se declaran todas las variables necesarias para la elaboración del programa.

```

#include<TimerOne.h> //aquí se incluye la librería TIMERONE en el programa de esta
manera se puede acceder a los 16 bits del Timer1 por medio de la escritura directa en las
direcciones de memoria, esto permite configurar el valor del período del timer en
microsegundos y al final de cada periodo se puede configurar una interrupción para algún
propósito específico (Arduino, Arduino, 2016).
int data = 0; // Declaración de variables a ser usadas, en específico la variable data es
inicializada en un valor = 0
inti;
int x;
int b;
int c;
int d;
voidsetup(){ // aquí se hacen todas las configuraciones iniciales, el programa pasará
por aquí una sola vez.
Serial.begin(9600); // se inicializa el puerto serial a 9600 Baudios.
Timer1.initialize(10000); // se inicializa el Timer1 y se escribe en el argumento su duración
en microsegundos.
  
```

```
pinMode(9, OUTPUT);    // en estas líneas se definen los pines 9,10,2,4 y 7 como salidas.
pinMode(10, OUTPUT);
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(7, OUTPUT);
}
```

4.1.2.- Segunda etapa, elección del voltaje máximo de salida

Usando la instrucción `switch()`, seleccionamos uno de los voltajes máximos disponibles para nuestro dispositivo, los cuales son: 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 1V, estos valores fueron tomados debido a que los multiplexores disponibles sólo tienen 8 entradas/salidas, en esta parte dependiendo de la opción tomada se escribe un código en las salidas digitales del Arduino y ésta a su vez habilita una de las salidas de los multiplexores que serán descritos posteriormente.

El código escrito en las salidas digitales sigue la tabla de la verdad del multiplexor usado, y fueron escritos así como se muestra en las siguientes líneas de código:

```
switch(data){
case 'a':
digitalWrite(2,LOW); //Pone la salida del pin 2 en 0 V o bajo.
digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(7,LOW);
delay(10); //Hace esperar 10milisegundos.
break; // Esta instrucción te hace salir del case.
```

En esta parte del programa se lee la variable “data” y en caso de ser igual al valor “a” se procede a realizar las instrucciones enmarcadas en ese caso, es decir en `case 'a'`.

4.1.3.- Tercera etapa, designación del período de la señal

Usando una estructura `switch()` nuevamente, se elige un número entero entre los designados para cada uno de los `case`, este valor pasa a ser el argumento de la función `delay()` o `delayMicroseconds()`. Por medio de estas funciones se puede hacer esperar al Arduino un tiempo determinado sin ejecutar otra instrucción, por lo que se puede utilizar para controlar el período de la señal de salida.

```
switch(data){
case 'm': //case m, si selecciona este case la variable “d” tomará un valor de 8000.
    d=8000; /* delay para 0.5Hz*/
break;
```

4.1.4.- Cuarta etapa, elección de la resolución

En esta sección del programa se genera la señal triangular mediante el uso de las instrucciones “for” y “while”. Se crean contadores de incremento o decremento que simulan la señal triangular que va desde un voltaje igual a 0V hasta un voltaje de 5V y luego en decremento. Igualmente en esta etapa se selecciona la resolución en pasos de las rampas entre los valores 128, 256, 512 o 1024. El código para aplicar cada resolución es básicamente el mismo y sólo varía la forma de contar (saltos en el contador).

En el Arduino existe por defecto una resolución máxima de 256. Esto significa que podemos aumentar el voltaje de salida de 0 a 5V en un máximo de 256 pasos, es decir; que el mínimo aumento o decremento que podemos hacer en voltaje es de $5/255V$ que es aproximadamente 19mV.

Para resolver esta limitante, se debe modificar el Timer1, el cual cuenta con un máximo de resolución de 16 bits (65536 pasos). Esto permite alcanzar una mayor resolución en la rampa de voltaje. Sin embargo, al modificar el Timer1 no es posible utilizar la función analogWrite() para controlar las salidas PWM. Existen varias maneras de superar esta limitante. En este estudio se utiliza la librería TIMERONE [https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_TimerOne.html], la cual permite la creación de una nueva función similar a la analogWrite() pero que permite manejar una mayor resolución. El código siguiente muestra cómo se utiliza esta librería para generar cada una de las resoluciones.

```
switch(data){
case 'i':  /****** Resolución de 128******/
while(x<128){    //Bucle while, fija el valor máximo de x y con esto el número de veces
que se hace el recorrido en el eje y, con cada ciclo del bucle while completado el valor del x
aumenta en 1.

/******Conteo creciente o de aumento******/
for(i=0;i<=128;i++) //se fijan los extremos del contador y se declara cómo es el conteo
{ b=8*i;           // esta variable indica un factor para multiplicar la variable “i” del
contador, cómo se quiere llegar a la máxima intensidad de voltaje con el conteo se debe
llegar a 1023 como argumento del PWM, por lo que para tener una resolución de 128x128
se debe contar de 8 en 8, por lo que cada valor asignado a la variable “i” debe ser
multiplicado por 8.
Timer1.pwm(9,b); //nueva función para controlar el PWM máximo valor del duty cycle el
cual es 1023.
Serial.print("PP"); // Se envía una señal al computador para controlar el simulador
delayMicroseconds(d); // tiempo de espera seleccionado
}
}
```

```

/*****Conteo decreciente*****/
for(i=128;i>=0;i--)
{
  b=8*i;
  Timer1.pwm(9,b);
  Serial.print("PP");
  delayMicroseconds(d);
  if(b == 0){
    x++;
    c=8*x;
    Serial.print(c);
    Timer1.pwm(10,c);

    }}}

while(x>0){ //En este bucle while con cada ciclo se disminuye un paso en el valor de
“x”, éste comenzará con el máximo valor del bucle anterior que es 128 y se repetirá hasta
que el valor de “x=0”.
/*****Conteo creciente o de aumento*****/

for(i=0;i<=128;i++)
{
  b=8*i;
  Timer1.pwm(9,b);
  Serial.print("PP");
  delayMicroseconds(d);
  }

/*****Conteo decreciente*****/

for(i=128;i>=0;i--)
{
  b=8*i;
  Timer1.pwm(9,b);
  Serial.print("PP");
  delayMicroseconds(d);
  if(b == 0){
    x--;
    c=8*x;
    Serial.print(c);
    Timer1.pwm(10,c);
    }}}
}

Serial.print("listo");
break;

```

4.2.- Circuito externo para generación de voltaje analógico

Para utilizar la señal de salida PWM generada desde el Arduino debe ser transformada en analógica, mediante un circuito externo que consta básicamente de dos partes, un filtro RC pasa bajos y un seguidor de tensión.

4.2.1.- Filtro RC

El filtro RC pasa bajos (Malvino, 2000) no es más que un filtro pasivo simple formado por una resistencia y un condensador conectados como lo muestra la figura 4.2.

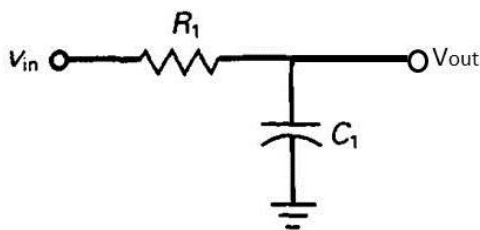


Figura 4.3. Filtro RC pasa bajos. (Malvino, 2000).

En el circuito de la figura 4.2, la impedancia del condensador es muy grande para pequeñas frecuencias y tiende a anularse para altas frecuencias, esta impedancia obedece la siguiente ecuación:

$$Z = -\frac{1}{\omega C} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Idealmente a partir de cierta frecuencia llamada frecuencia de corte, el voltaje de salida desaparece. El comportamiento real es el mostrado en la Figura 4.3.

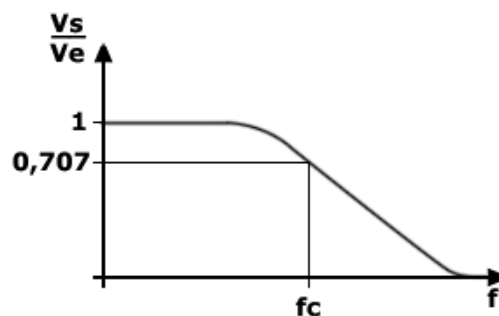


Figura 4.4. Razón de voltaje salida/entrada en función de la frecuencia (Wanadoo, 2015)

Aquí se define la frecuencia de corte como la frecuencia para la cual el cociente entre el voltaje de salida V_s y el voltaje de entrada V_e tiene un valor 0,707 (Malvino, 2000). Esta frecuencia viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Con la implementación de este circuito se suavizó la señal de salida convirtiéndola en una señal DC.

En el presente trabajo se usó un condensador de $10 \pm 20\% \mu\text{F}$ y una resistencia de $4,7 \pm 2\% \text{K}\Omega$ lo cual nos produce una frecuencia de corte de $3.39 \pm 0,74 \text{ Hz}$ la cual es mucho menor que la frecuencia del PWM del Arduino que es aproximadamente 490 Hz (Artero, 2013) y con esto cumple con la condición para eliminar los armónicos y generar una señal analógica (Microchip, 1997).

4.2.2.- Circuito seguidor de tensión

El seguidor de tensión es construido con un amplificador operacional LM358N con ganancia unitaria (Malvino, 2000), lo cual permite mantener constante la señal proveniente del filtro y desacoplar esta etapa de la siguiente y evitar problemas de impedancia así como también proveer la corriente suficiente para alimentar el circuito, ya que cada pin del Arduino puede proveer un máximo de 40 mA, aunque en realidad, de manera interna la placa agrupa los pines del 0 al 4 y estos pueden aportar como máximo 100 mA y el resto, es decir, del 5 al 13 pueden aportar otros 100mA, esto nos da como resultado que a la vez, cada pin es capaz sólo de suministrar 20 mA como máximo.

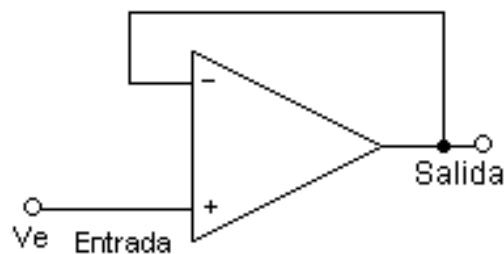


Figura 4.5. Seguidor de tensión (Galeon, 2015)

4.2.3.- Circuito amplificador de voltaje

Usando un amplificador operacional LM358N y un par de resistencias de igual valor, se implementó un circuito amplificador no inversor de ganancia 2. Esto con la finalidad de aumentar el voltaje máximo de salida del Arduino desde un máximo de 5 V hasta 10 V. En la figura 4.6. Se muestra un ejemplo de dicho circuito, en la cual se puede notar que el voltaje de salida V_{out} es mayor que el voltaje de entrada V_{in} .

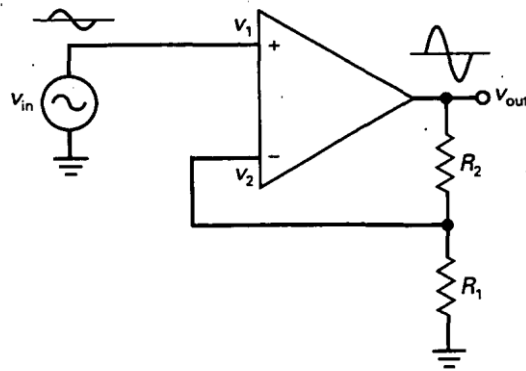


Figura 4.6. Amplificador no inversor (Malvino, 2000).

El valor del voltaje de salida dependerá netamente de la ganancia del circuito y dicha ganancia dependerá del par de resistencias seleccionadas, la ecuación que modela este comportamiento es la siguiente:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{in} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

El factor colocado entre paréntesis en la ecuación 4.3 representa la ganancia del sistema. En este trabajo se utilizó un par de resistencias de $1 \pm 2\% \text{ K}\Omega$, lo cual genera una ganancia teórica de $A = 2$.

4.2.4.- Multiplexores y divisores de tensión

Utilizando multiplexores y divisores de tensión se logró controlar la intensidad de voltaje de salida máximo del circuito manteniendo la resolución en bits intacta.

El multiplexor funciona como un switch analógico que es capaz de redireccionar la señal de entrada hacia la salida habilitada mediante el código escrito por el Arduino (figura 4.7). Cada salida de éstas lleva a un divisor de tensión (Boylestad, 2004) diferente que permite elegir entre una gama de voltajes máximos. En la figura 4.8. Se muestra el código necesario para activar cada una de las salidas disponibles, en este trabajo se utilizó el multiplexor analógico CD4051B, el cual puede ser implementado para direccionar señales analógicas.

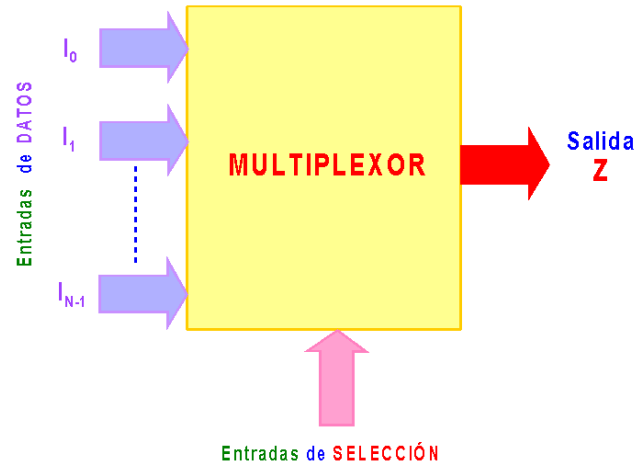


Fig. 4.7. Esquema de funcionamiento de un Multiplexor. Las diferentes señales son introducidas por las entradas de datos y mediante las entradas de selección, se habilita una sola de ellas y es mostrada en la salida Z (Aalvarezca, 2008).

Como ejemplo de la metodología utilizada, consideremos un voltaje máximo de salida de 5V. Para lograr esto, se alimentó el multiplexor con 10 V de entrada y a la salida se acopló un divisor de tensión de dos resistencias iguales, lo que genera que el voltaje de salida medido en una de las resistencias, sea la mitad del de entrada, como lo muestra la figura. 4.8.

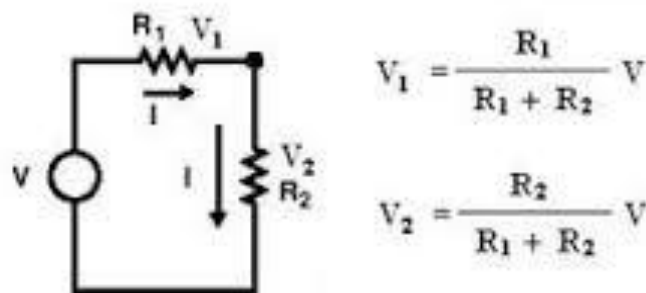


Figura 4.8. Divisor de voltaje convencional. Si el voltaje de entrada es 10V y las resistencias R_1 y R_2 son iguales se obtiene una salida de 5V en cada una de ellas. (Wikispaces, 2015)

Tabla de verdad

Estado de las entradas				Salida/entrada habilitada
Inhibidores	C	B	A	
CD4051B				
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	X	X	X	Ninguna

Figura. 4.9. Tabla de la verdad del multiplexor CD4051B (Texas Instruments, 1998).

El circuito externo final implementado fue el siguiente, con la salvedad que las resistencias utilizadas en los divisores fueron diferentes debido a la falta de materiales en el mercado, cada cambio será especificado en el capítulo siguiente.

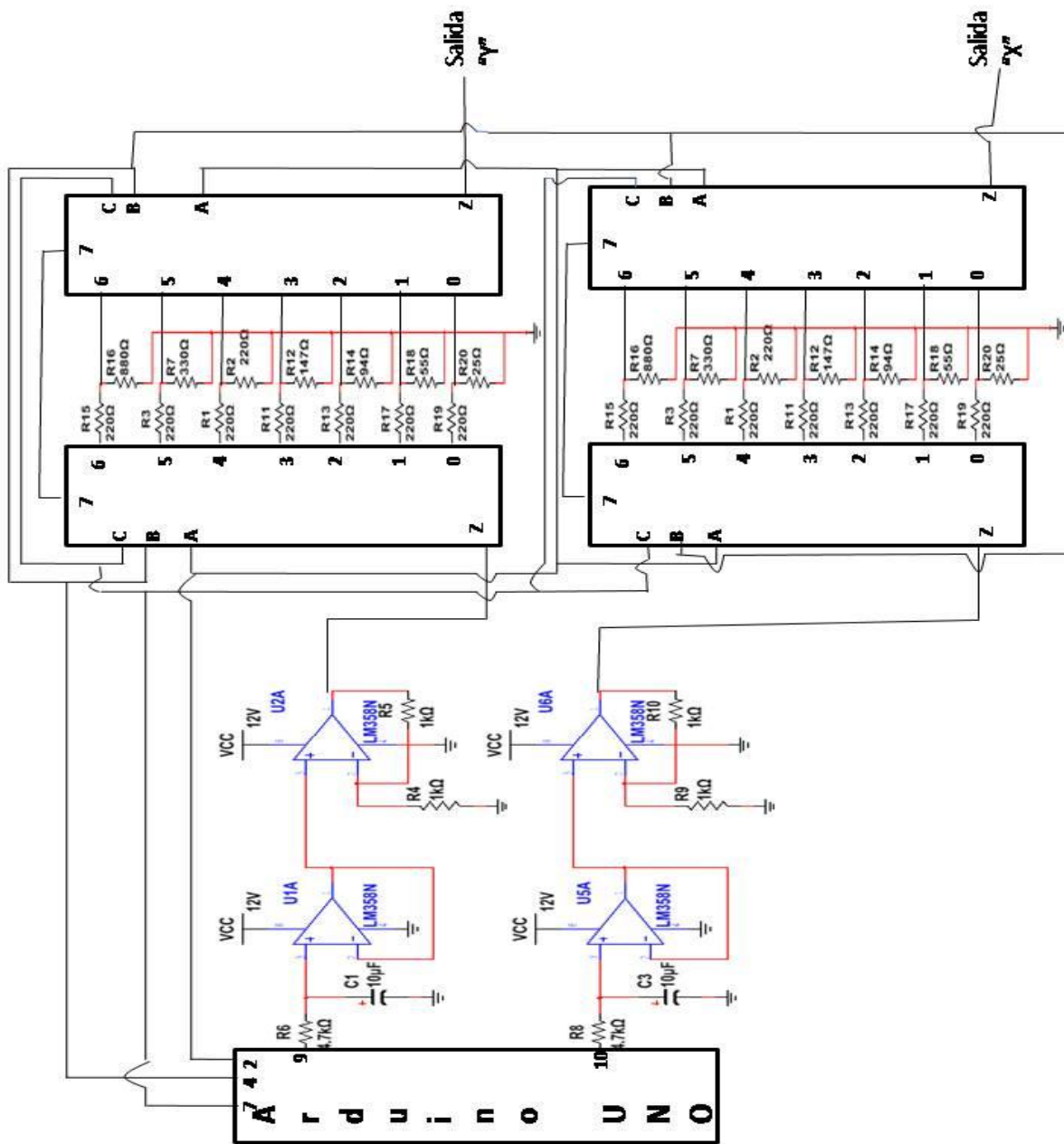


Figura 4.10. Esquema del circuito externo implementado.

4.3.- Medición de elongación en función de voltaje

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema diseñado e implementado se procedió a hacer medidas de los desplazamientos obtenidos en los piezoactuadores como producto de los voltajes generados. Las mediciones de las diferentes distancias se hicieron con el uso de un interferómetro de luz blanca Zygo NewView 600 (ver figura 4.10) Este posee un rango de resolución horizontal o lateral que va desde los $0.36 \mu\text{m}$ hasta los $5.18 \mu\text{m}$ dependiendo del objetivo seleccionado, en este trabajo la resolución es de $0,52 \mu\text{m}$ y el objetivo de 50X (Zygo Corporation, 2007).



Figura 4.11. Zygo NewView 600.

El fenómeno de interferencia se da cuando se genera la superposición de dos ondas coherentes. Esto quiere decir que mantienen su diferencia de fase constante en el tiempo y se puede observar y medir un patrón de interferencia estacionario (Arturo Plata, 2008), el interferómetro funciona midiendo la posición del máximo de interferencia, la cual varía dependiendo de la diferencia de caminos existente entre el rayo de luz reflejado en la muestra y el reflejado en el espejo.

Los datos de las elongaciones se obtuvieron al colocar uno de los piezoeléctricos (con su base móvil) directamente sobre la base del interferómetro tal como se muestra en la figura 4.11.

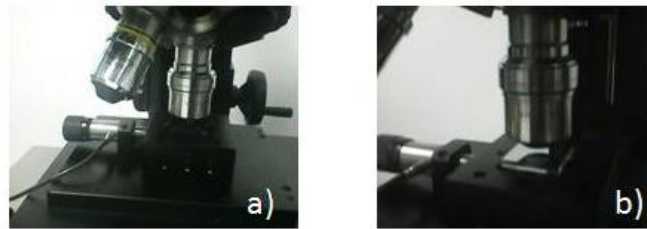


Figura 4.12. a) Piezoeléctrico con base móvil en el momento de ser medido uno de sus desplazamientos. b) Se puede observar la red cristalina usada como referencia en el momento de medir.

En el proceso de medida se usó el patrón base utilizado para la calibración del instrumento (figura 4.11 b) y se fijó una línea del patrón como referencia para medir el desplazamiento neto. El objetivo usado para observar la imagen fue el máximo disponible que es el de 50X.

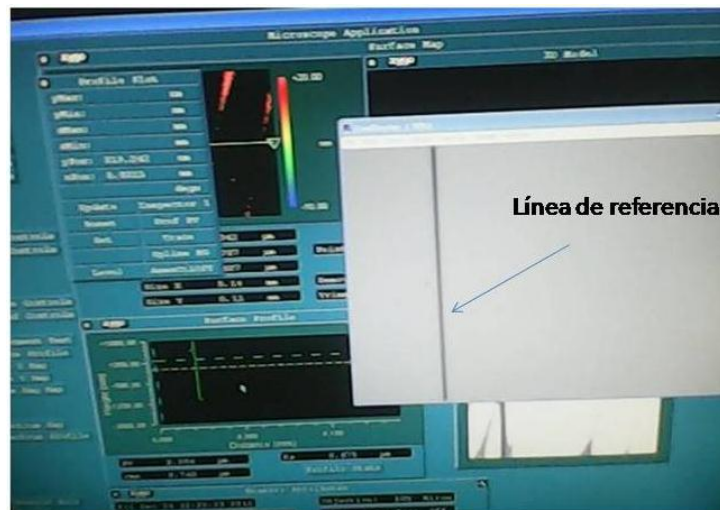


Figura 4.13. Fotografía de una de las medidas de elongación hecha con el interferómetro.

En la figura 4.12. Se señala la línea que es tomada como referencia, se midió la posición inicial, es decir, cuando el voltaje aplicado por el Arduino es nulo, y luego se fueron evaluando cada una de las posiciones respectivas con cada aumento de voltaje.

4.4.- Interfaz gráfica programa en Visual Basic 6.0

La interfaz fue desarrollada en Visual Basic 6.0, el cual es un ambiente de desarrollo gráfico que funciona bajo el sistema operativo Microsoft Windows y es manejado por eventos, lo cual implica que se ejecutan diferentes secciones del código dependiendo de las acciones realizadas por el usuario.

El bloque básico de construcción en Visual Basic es el objeto, el cual puede tener diferentes propiedades o usos dependiendo de su finalidad. Se le llama objeto a toda ventana, control, barra de herramientas o botón implementado en Visual Basic.

En la figura 4.13. Se muestra el Ambiente Integrado de Desarrollo (IDE del inglés Integrated Development Enviroment) de Visual Basic.

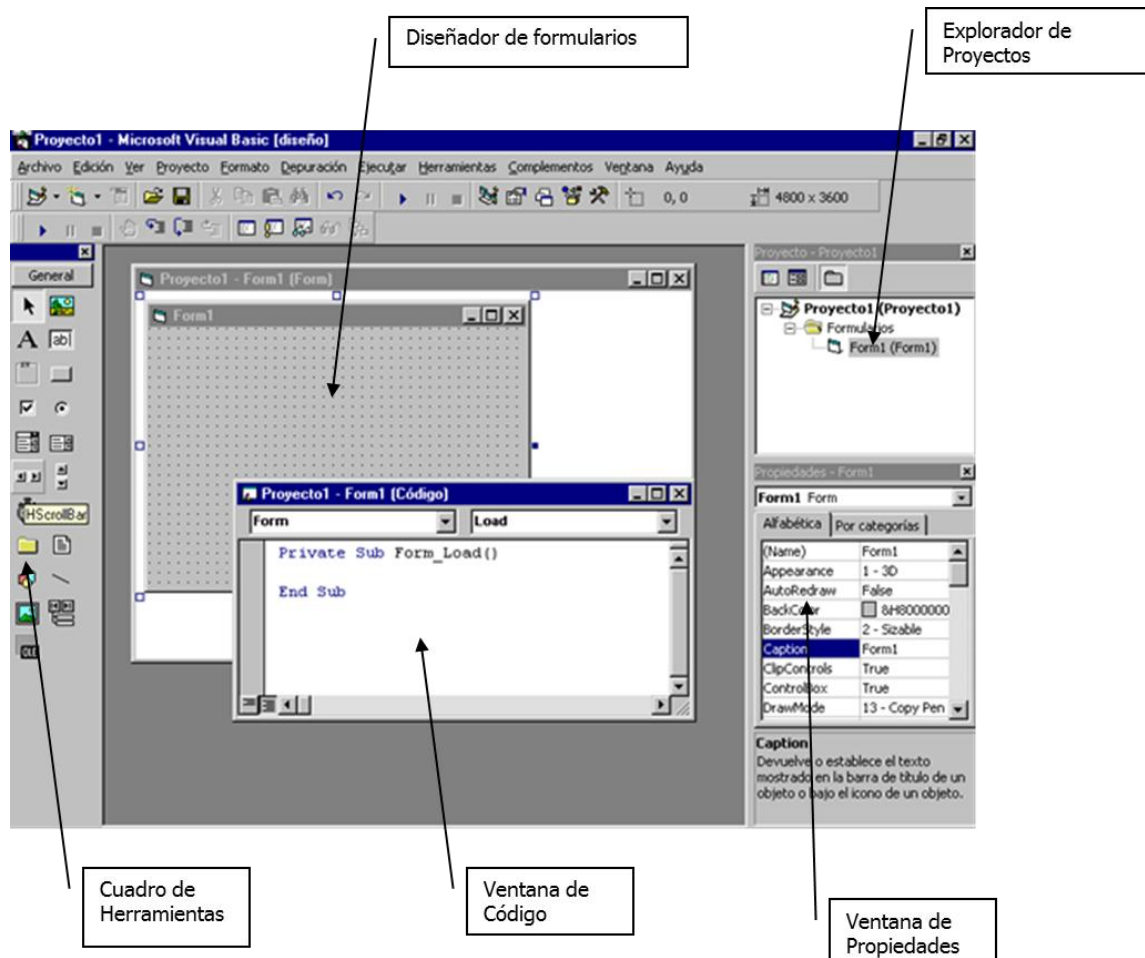


Figura 4.14. El IDE Visual Basic.

En este trabajo se desarrolló una interfaz gráfica capaz de intercambiar información con el dispositivo Arduino por medio del puerto USB y así hacer posible de manera sencilla que el usuario pueda elegir las condiciones mediante las cuales van a moverse los piezoeléctricos.

En la interfaz de usuario final, el usuario debe seleccionar el puerto COM donde se encuentra conectado el Arduino y luego de llevada a cabo esta tarea, el usuario es libre de elegir las distintas combinaciones disponibles entre, voltaje de salida, período y resolución.

CAPÍTULO 5

Resultados y discusiones

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos luego de la implementación del sistema diseñado para la alimentación de un piezocontrolador MDT693 y por medio de éste, suministrar el voltaje necesario para activar dos piezoactuadores. El control de las señales se llevó a cabo mediante la programación un sistema de desarrollo Arduino uno.

5.1.- Interfaz gráfica para el control de voltajes de salida

Las señales fueron controladas con el uso de la interfaz gráfica creada con Visual Basic 6, la cual permite la escritura en el programa principal. Debido a que el programa principal de Arduino recibe las órdenes de manera secuencial, se colocaron varios timers que controlan el tiempo y el orden en el cual son enviadas las instrucciones y así evitar que el programa reciba una instrucción errónea.

Al enviar las instrucciones el programa realiza una simulación del recorrido del piezoeléctrico dentro de un recuadro en el cual distribuye de manera uniforme la distancia del recorrido dependiendo de la resolución elegida. En la figura 5.1 se muestra cómo se ve la interfaz y el cuadro de simulaciones.

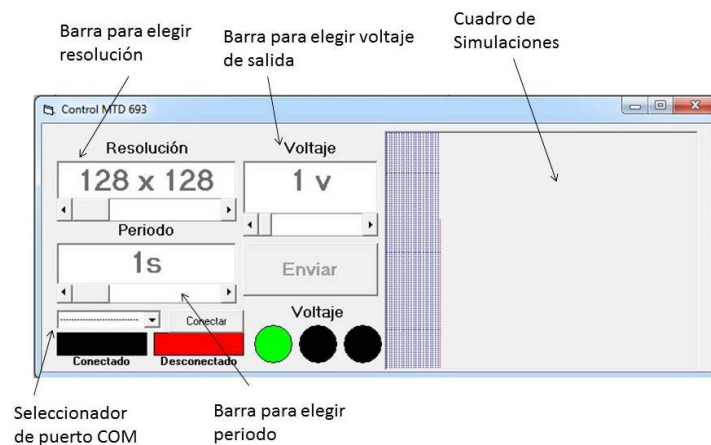


Figura. 5.1. Interfaz Gráfica de control.

La interfaz trabaja con barras, las cuales son modificadas con el puntero. Se pueden seleccionar las diferentes resoluciones y voltajes de salida así como también el período de barrido. Con respecto a esta última característica, no se realizaron medidas exactas del tiempo. Para efecto del presente trabajo, lo primordial fue tener en cuenta que para recorridos más largos, la velocidad de barrido debe ser más lenta y que recorridos cortos se pueden hacer a mayor velocidad. Esto fue pensado en el caso de implementar el sistema para mover la punta (o muestra) de un SPM.

El programa fue desarrollado con su instalador propio y es compatible con Windows XP y 7 de 32 y 64 bits, para versiones más recientes de Windows no se hicieron las pruebas.

La interfaz funciona al conectarse con el puerto donde ha sido conectado el Arduino, es decir, una vez conocido el puerto COM donde se encuentra el Arduino se selecciona la interfaz y se procede a elegir la configuración deseada de voltaje, resolución y período.

En la figura 5.2. se muestra un acercamiento del simulador de recorrido integrado en la interfaz.

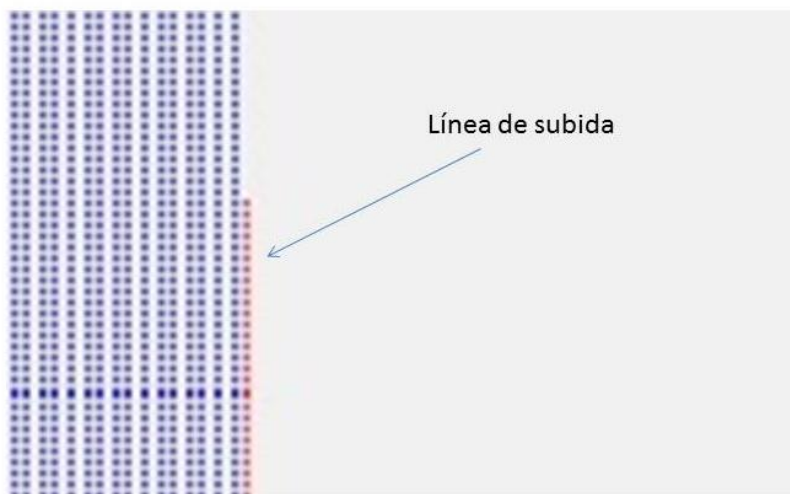


Figura 5.2. Simulador de recorrido.

Las líneas azules de la Fig. 5.6. representan las líneas recorridas de ida y vuelta por el piezoeléctrico y la línea roja representa la que se está recorriendo, cada punto de esas líneas corresponde a una orden de Arduino. Cada vez que el contador aumenta en 1, el

Arduino envía una señal que es interpretada como colorear un pixel de rojo. Al llegar al tope del conteo, comienza el conteo regresivo, allí se da la orden de colorear el pixel de rojo, al llegar a cero se corre una línea a la derecha y se repite todo el proceso.

5.2.- Evaluación de la elongación del piezoeléctrico

Al alimentar el MDT693 con la salida el circuito ideado, se procedió a medir las elongaciones de uno de los piezoactuadores como función de distintos valores de voltaje máximo para una misma resolución en bits. Esto tuvo como objetivo evaluar el comportamiento del sistema diseñado en condiciones de funcionamiento en modo estático. Para esta evaluación se midió la elongación del piezoeléctrico, medida mediante un microscopio de interferometría de luz blanca, como función de un voltaje fijo de salida. La señal de salida fue aumentada en pasos de 128 bits usando un programa sencillo que solamente escribe un valor fijo en una salida PWM establecida. Este tipo de evaluación contrasta con el comportamiento dinámico, en el cual, se alimenta el piezoactuador con una señal triangular o de doble rampa.

Los valores de voltaje máximo obtenidos no fueron los esperados teóricamente, ya que los divisores de tensión se construyeron con los elementos resistivos presentes en el mercado local, es decir, que en vez de tener los valores de 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2 y 1V se obtuvieron: 10,25; 6,8; 4,03; 2,64; 2,15; 1,48; 0,83 y 0,46 V respectivamente. Las señales triangulares obtenidas son bastante periódicas y reproducibles, aunque existen aún algunas componentes que muestran picos de alta frecuencia debido a que no todos los armónicos logran ser atenuados, quizás disminuyendo la frecuencia de corte se podría obtener un mejor resultado.

Los siguientes gráficos muestran los resultados de las mediciones hechas con el microscopio.

Tabla 5.1 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 10 V.

Gráfica de elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (10V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	63,60
256	64,90
384	66,40
512	69,90
640	70,20
768	71,00
896	72,10
1024	72,80

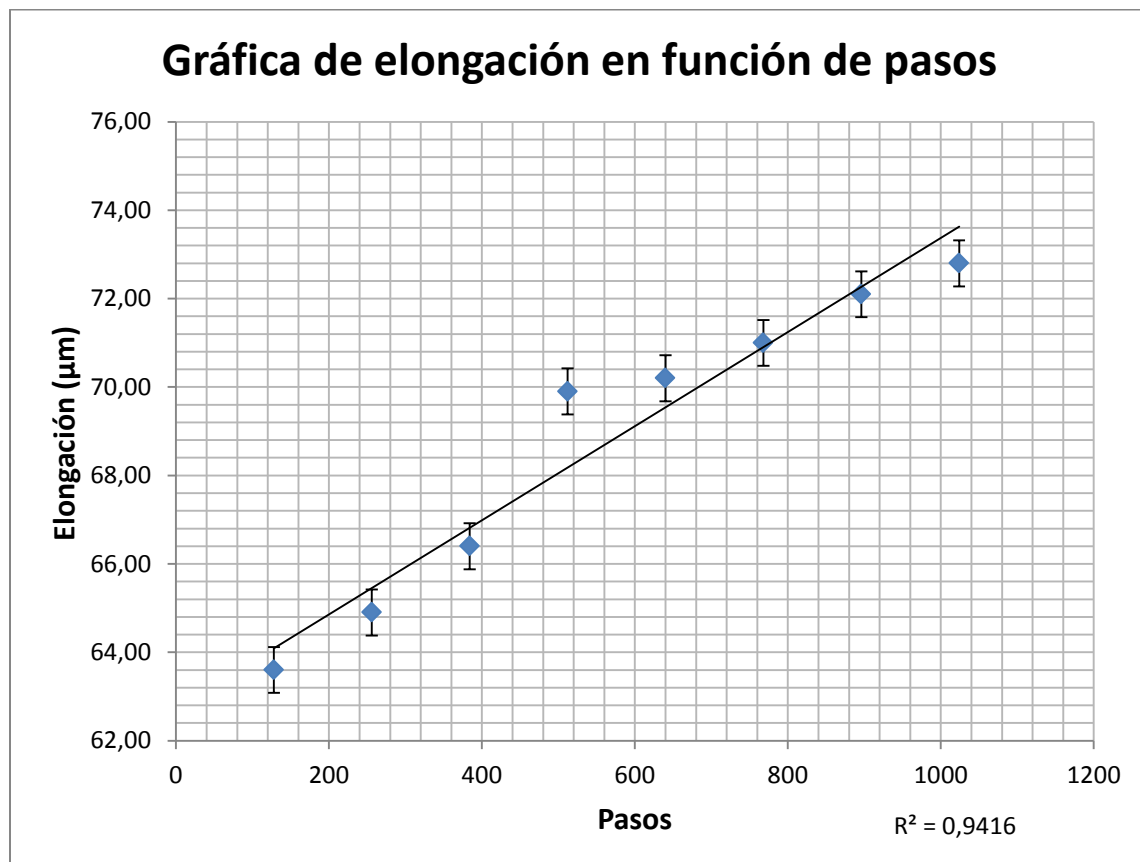


Figura 5.3. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 10 V (voltaje real medido 10,25 V).

Tabla 5.2 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 8 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (8V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	63,60
256	64,50
384	65,10
512	66,00
640	67,30
768	68,40
896	70,20
1024	70,40

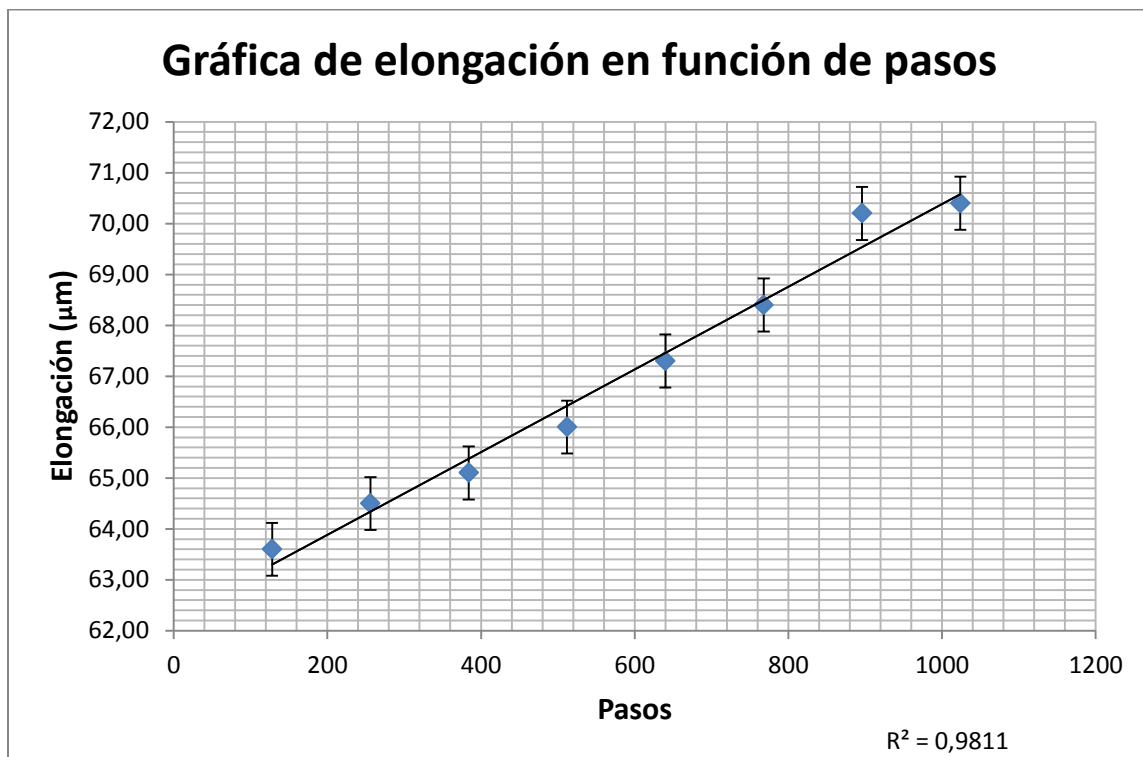


Figura 5.4. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 8 V (voltaje real medido 6,8 V).

Tabla 5.3 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 6 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (6V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	65,10
256	66,00
384	66,70
512	67,50
640	68,60
768	69,70
896	70,60
1024	71,00

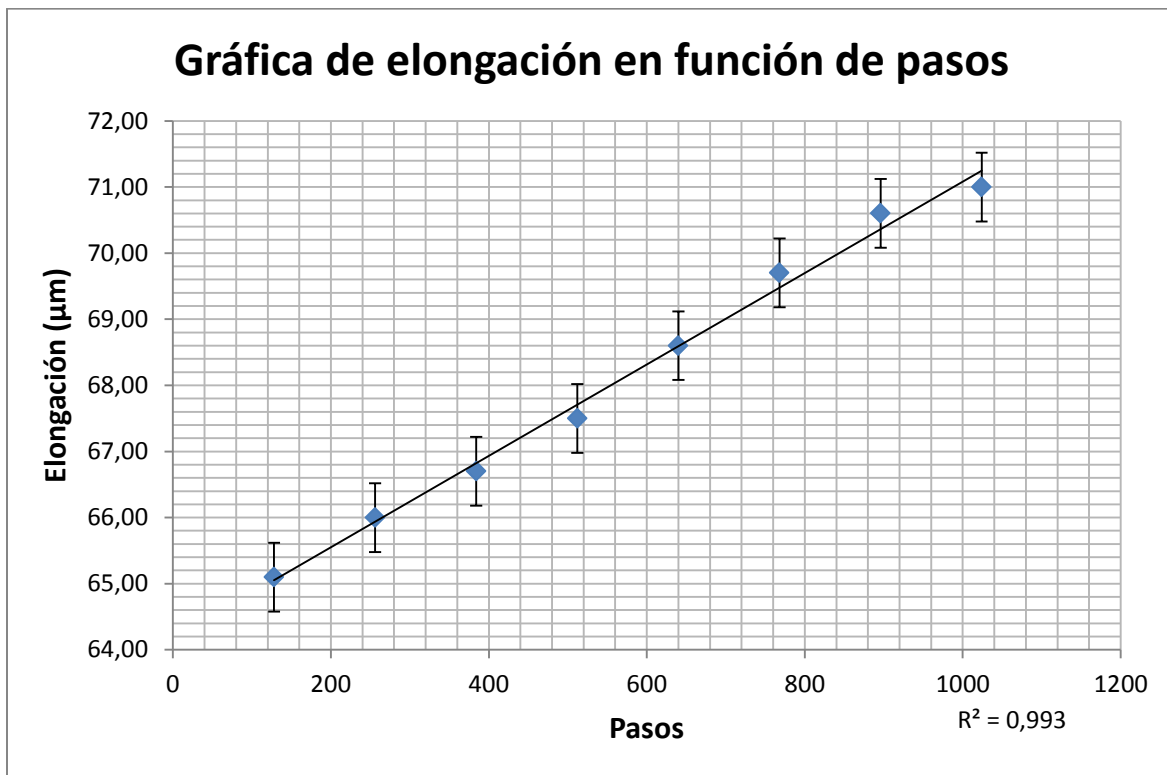


Figura 5.5. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 6 V (voltaje real medido 4,03 V).

Tabla 5.4 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 5 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (5V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	80,70
256	80,70
384	81,10
512	81,80
640	82,70
768	82,70
896	83,10
1024	83,10

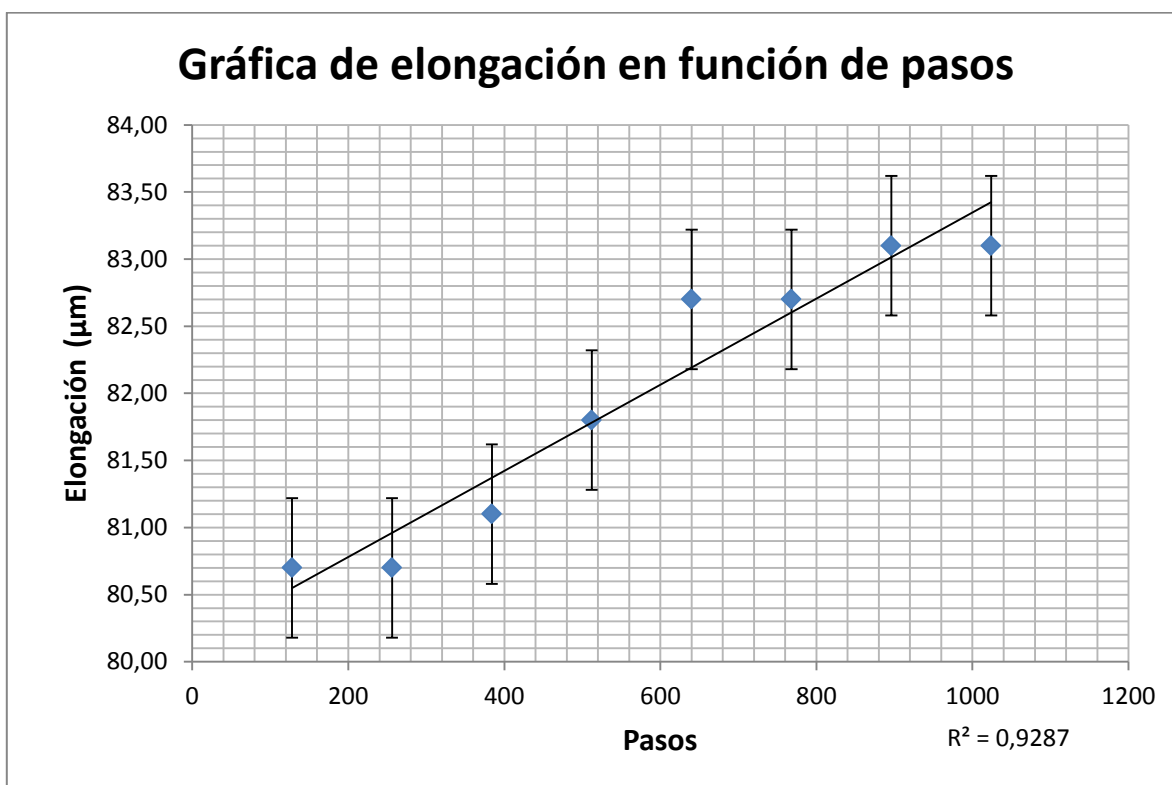


Figura 5.6. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 5 V (voltaje real 2,64 V).

Tabla 5.5 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 4 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (4V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	67,10
256	67,30
384	67,50
512	68,00
640	68,40
768	68,80
896	69,10
1024	69,10

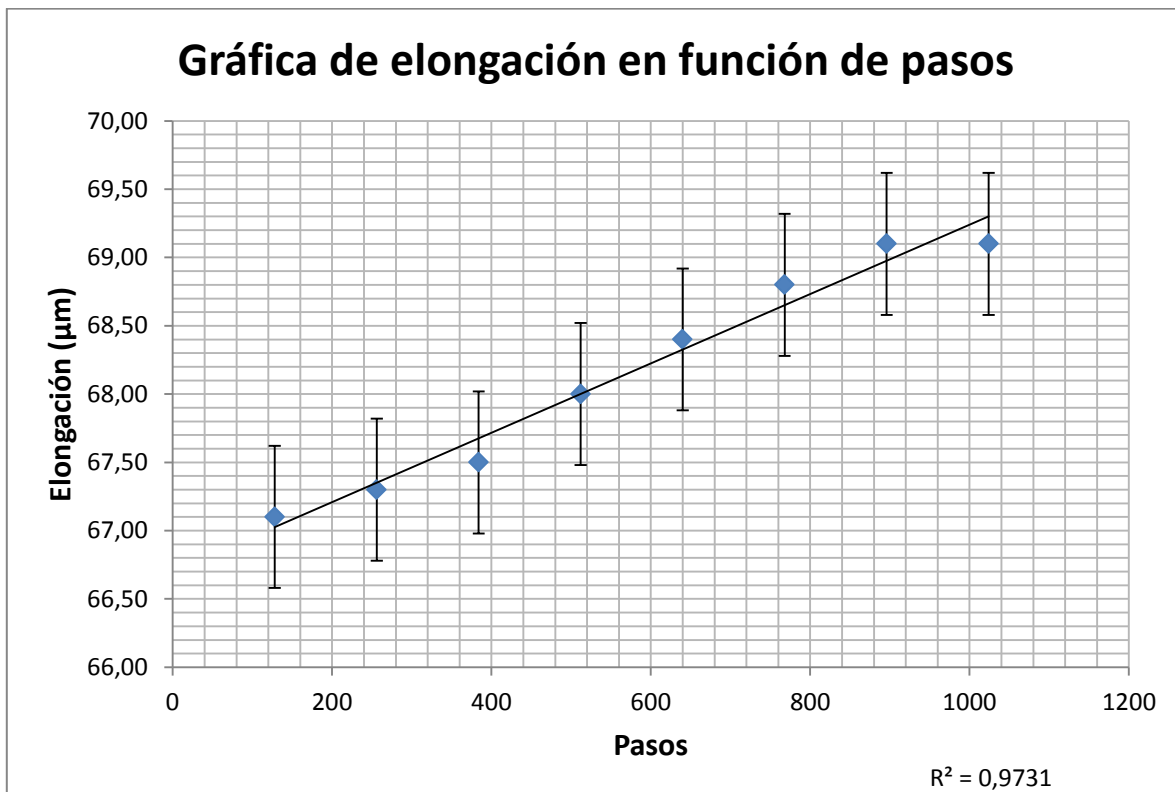


Figura 5.7. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 4 V (voltaje real medido 2,15 V).

Tabla 5.6 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 3 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (3V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	67,10
256	67,10
384	67,10
512	67,50
640	67,80
768	68,00
896	68,20
1024	68,20

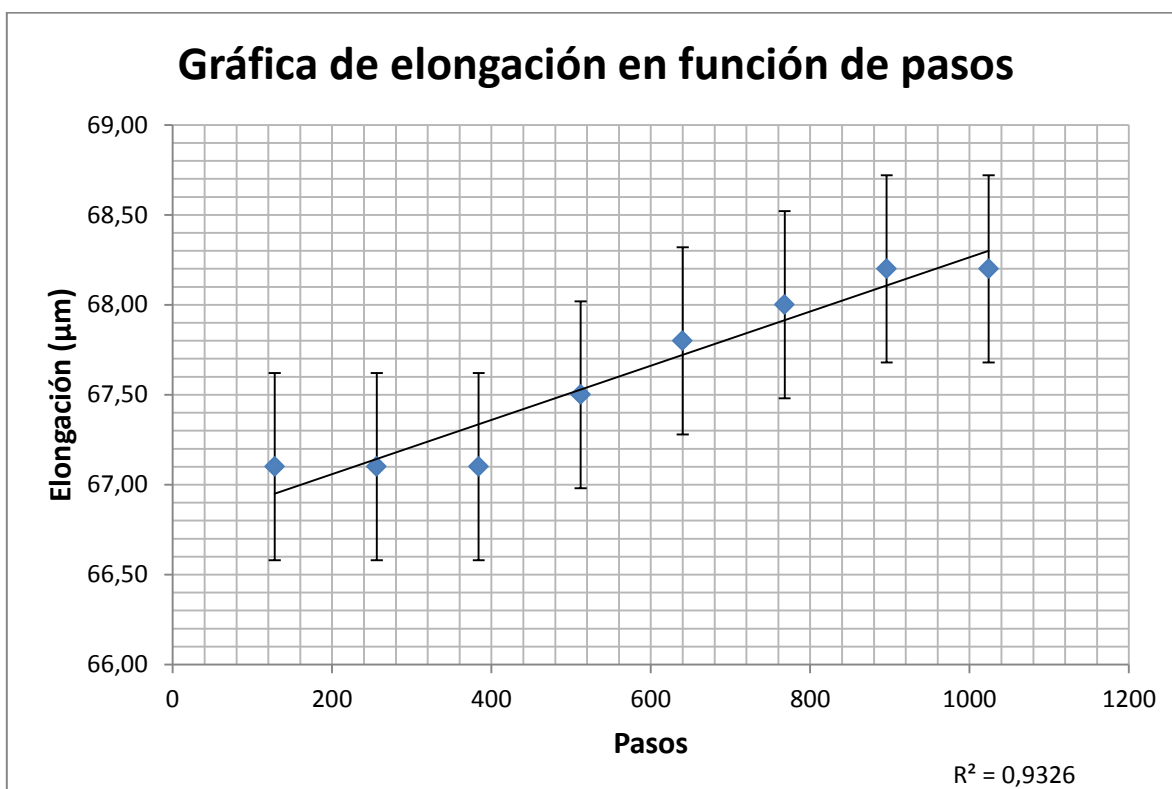


Figura 5.8. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 3 V (voltaje real medido 1,48 V).

Tabla 5.7 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 2 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (2V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	66,90
256	67,10
384	67,10
512	67,30
640	67,30
768	67,50
896	68,00
1024	68,00

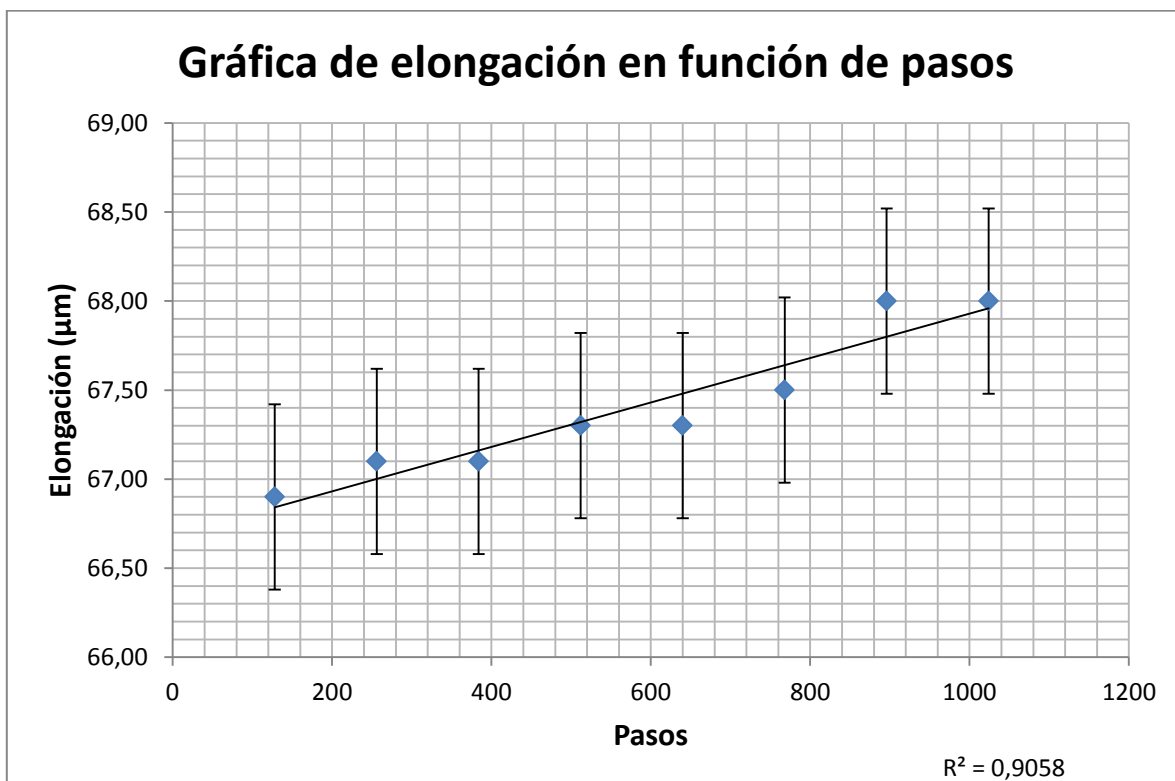


Figura 5.9. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 2 V (voltaje real medido 0,83 V).

Tabla 5.8 Datos de la gráfica de elongación en función de pasos para un voltaje máximo nominal de 1 V.

Datos de la elongación en función de pasos	
<i>Pasos ± 1 (1V)</i>	<i>Elongación $\pm 0,52$ (μm)</i>
128	67,10
256	67,10
384	67,10
512	67,10
640	67,30
768	67,30
896	67,30
1024	67,30

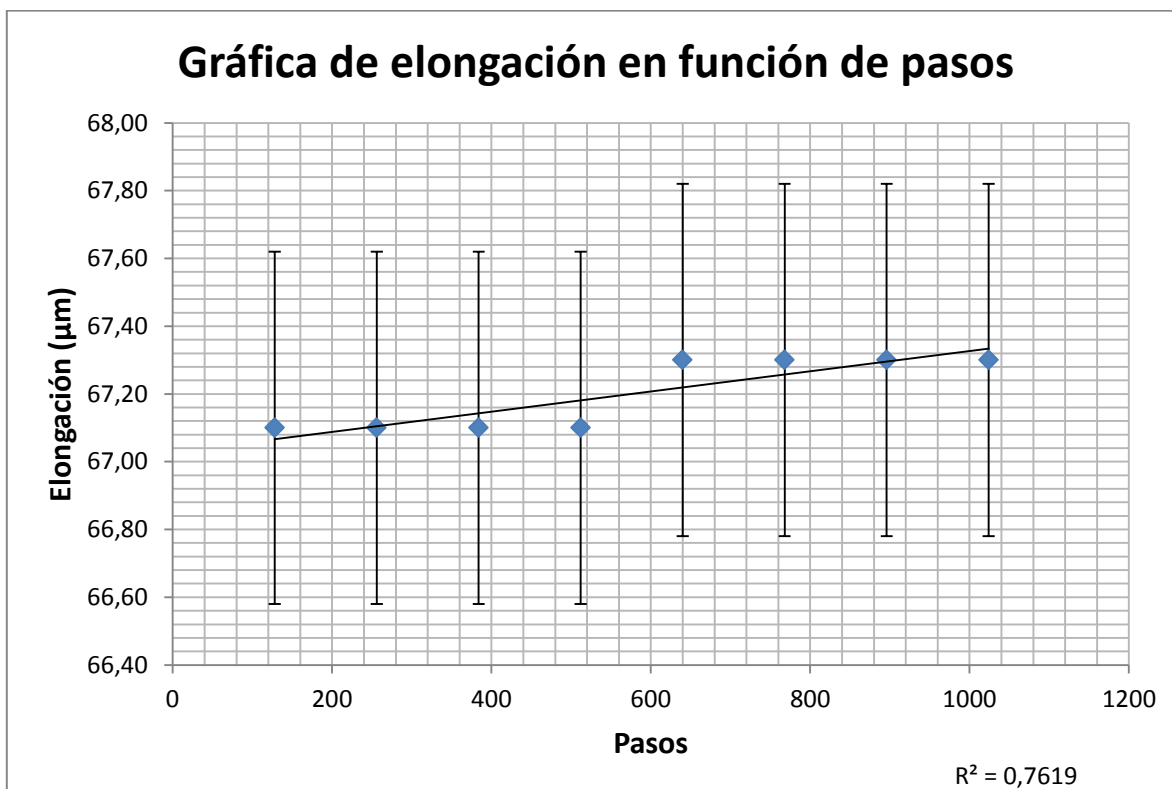


Figura 5.10. Elongación en función de los pasos para un voltaje máximo nominal de 1 V (voltaje real medido 0,46 V).

En todas las gráficas anteriores el comportamiento es de aumento de las dimensiones del piezoeléctrico en función del aumento del voltaje aplicado por medio del piezocontrolador.

Los valores de voltajes mínimos posibles fueron calculados tomando el valor del mayor voltaje medido y dividiéndolo entre la máxima cantidad de estados posibles para este trabajo (1024 estados), por lo que es conocido el voltaje aplicado en cada uno de los pasos definidos para gráficas. En la tabla de la Tabla 5.9 se muestra la información obtenida de los gráficos anteriores.

Tabla 5.9. Resultados obtenidos para el Voltaje máximo real, Voltaje mínimo posible, Voltaje para pasos de 128 bits y Elongación promedio de las mediciones realizadas con el interferómetro.

Voltaje máximo real (V)	Voltaje mínimo posible (V)	Voltaje aplicado para pasos de 128 bits (V)
10,25	0,0100098V	1,2812544
6,80	0,0066406V	0,8499968
4,03	0,0039355V	0,503744
2,64	0,0025781V	0,3299968
2,15	0,0020996V	0,2687488
1,48	0,0014453V	0,1849984
0,83	0,0008105V	0,103744
0,46	0,000492V	0,062976

En las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 las gráficas muestran comportamientos muy cercanos a la linealidad. Lo cual indica que para estos valores de voltaje máximo es posible reproducir en la elongación del piezoeléctrico el comportamiento programado desde el Arduino. Sin embargo en las gráficas, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 comienzan a aparecer puntos en los cuales el cambio de voltaje aplicado al piezoeléctrico no genera una elongación observable en el mismo, esto pudiese ser interpretado de varias maneras, la primera es que el movimiento producido en estos casos es menor a la resolución del interferómetro y por ende no apreciable en las mediciones, en segundo lugar pudiese estar relacionado con la resolución mínima de voltaje que puede detectar el piezocontrolador en su entrada de voltaje externo. Por último también debe existir un voltaje umbral para el cual el piezoeléctrico comienza a

estirarse, ya que la base móvil donde está adaptado posee un sistema de resortes que obliga a mantenerse en una posición determinada, por lo que el piezoeléctrico debe vencer la fuerza que le aplica este sistema y así poder desplazarse de la posición inicial.

En particular en las dos últimas gráficas (figura 5.8 y 5.9) el comportamiento antes mencionado es mucho más notorio. En la figura 5.8. la respuesta del piezoeléctrico se asemeja a una función escalón y en la figura 5.9 se puede notar que para valores menores a 512 pasos, lo que equivale aproximadamente a 0,25 V, el piezoeléctrico no responde, sino que es a partir de este valor que comienza el movimiento y puede vencer la fuerza generada por los resortes.

En el siguiente link <https://www.youtube.com/watch?v=SKUNwj-fjYc&feature=youtu.be>, se puede observar el movimiento de uno de los piezoactuadores en respuesta a la señal triangular generada con el sistema implementado en este trabajo. El video muestra la reacción continua del piezoactuador debido a la excitación dinámica que se le aplica.

El movimiento observado es solamente una parte de recorrido en forma de “raster” antes mencionado, ya que se muestra sólo el movimiento de uno de los piezoeléctricos.

Conclusiones

En el presente trabajo se utilizó el dispositivo Arduino UNO para alimentar de manera controlada el piezocontrolador MDT693 de la compañía Thor labs, con la finalidad de manejar piezoactuadores que posteriormente pudiesen ser utilizados en la construcción de SPM, esto fue logrado mediante la implementación de un programa basado en la activación de las salidas pseudo-analógicas existentes para el modelo de Arduino antes mencionado, el programa a su vez es controlado por una interfaz gráfica desarrollada en el entorno Visual Basic.

A fin de adecuar la señal proveniente del Arduino a las requeridas por la entrada de voltaje externo del MDT693 se construyó un circuito formado por un filtro RC pasa bajos, un seguidor de tensión, un circuito amplificador y una serie de multiplexores que pueden redirigir la señal a un divisor de tensión y así obtener un máximo de voltaje a la salida determinado.

Para cuantificar el resultado de la acción del sistema de control ensamblado sobre los piezoactuadores se midieron las elongaciones de uno de los piezoeléctricos utilizando un interferómetro de luz blanca.

De estas medidas de longitud se pudo observar el comportamiento no lineal de los piezoeléctricos y la efectividad del circuito, ya que en efecto se pudo constatar el movimiento acorde a lo enviado por el Arduino.

Sin embargo con los datos obtenidos no se puede caracterizar el piezoeléctrico utilizado, ya que se debe hacer un estudio más detallado sobre la parte de decremento del conteo, esto para cuantificar los efectos de histéresis existentes en este tipo de actuadores, así como también determinar con mayor exactitud la resolución mínima de voltaje para activarlos y con esto poder adecuar los pasos de voltaje en el programa de Arduino.

Debido a la poca información existente sobre las aplicaciones de las salidas PWM en proyectos de alta precisión y alta resolución, este trabajo resulta una contribución para futuras investigaciones en el ámbito del uso de Arduino para sistemas de control de bajo costo y alta precisión.

Bibliografía

- Aalvarezca. (28 de Enero de 2008). *Boiro´s Blog*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2015, de <https://aalvarezca.wordpress.com/>:
<https://aalvarezca.wordpress.com/category/redes/>
- Aliexpress. (2 de Diciembre de 2015). *Aliexpress.com*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de http://es.aliexpress.com/store/product/Sintron-New-Arduino-Uno-R3-Board-USB-cable-reference-PDF-files-for-starter/114769_798850128.html
- Arduino, C. (2016). *Arduino*. Recuperado el 29 de Enero de 2016, de www.arduino.cc:
<https://www.arduino.cc/en/Main/CTCprogram>
- Arduino, C. (2016). *Arduino*. Recuperado el 30 de Marzo de 2016, de www.Arduino.cc:
<http://playground.arduino.cc/Code/Timer1>
- Artero, O. T. (2013). *Arduino: Curso práctico de formación*. Madrid: RC libros.
- Arturo Plata, M. Y. (2008). Caracterización de Sistemas de Desplazamientos Nanométricos con Microscopía Interferométrica. *GTI*, 48-55.
- Boylestad, R. L. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. Mexico: Pearson Educación.
- Comunidad de Arduino. (2015). *Arduino.cc*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2015, de <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>:
<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>
- Comunidad de Arduino. (12 de Diciembre de 2015). *Arduino.cc*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2015, de www.Arduino.cc: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>
- G. Binning, H. R. (1982). Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl. Phys. lett.*
- Galeon. (10 de Diciembre de 2015). *Galeon.com*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2015, de [Galeon.com: http://kagiva.galeon.com/3ds/tutores/opam.html](http://kagiva.galeon.com/3ds/tutores/opam.html)
- Ivan González, J. G.-A. (6 de Septiembre de 2003). *Hardware libre: Clasificación y desarrollo de hardware reconfigurable en entornos GNU/Linux*. Madrid, España.

- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Illinois: Prentice Hall.
- Malvino, A. P. (2000). *Principios de Electrónica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Microchip. (1997). *Using PWM to Generate Analog Output*. U.S.A.: Microchip Technology Incorporated.
- Mironov, V. (2004). *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*. Nizhniy Novgorod: The Russian Academy of Sciences.
- Peter Eaton, P. W. (2010). *Atomic Force Microscopy*. New York: Oxford University Press.
- Resnick Robert, H. D. (2002). *Física Volumen 2*. Mexico: S.L. (Grupo Patria Cultural) ALAY ediciones.
- Slideshare. (15 de Diciembre de 2015). *Slideshare.net*. Recuperado el 25 de Diciembre de 2015, de <http://www.slideshare.net/nasirabbas9862/wireless-data-monitoring-of-hybrid-powered-street-light-system>
- Texas Instruments. (1998). *DataSheet CD4051B, CD4052B, DC4053B*. Dallas: Texas Instruments.
- Veeco Instruments Inc. (2005). *A Practical Guide to: SPM Scanning Probe Microscopy*.
- Wanadoo. (13 de Diciembre de 2015). *perso.wanadoo.es*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2015, de <http://perso.wanadoo.es/ecatob/electronica.htm>
<http://perso.wanadoo.es/ecatob/electronica.htm>
- Wikipedia, C. d. (29 de Diciembre de 2015). <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_efecto_t%C3%BAnel:
https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_efecto_t%C3%BAnel#/media/File:Raster_tunnelmikroskop-schema_es.svg
- Wikipedia, C. d. (2 de Febrero de 2016). <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>. Recuperado el 3 de Enero de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_fuerza_at%C3%B3mica:

https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_fuerza_at%C3%B3mica#/media/File:Microscopio_de_fuerza_atmica_esquema_v2.svg

Wikispaces. (2015). *divisordevoltaje.wikispaces.com*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de [divisordevoltaje.wikispaces.com: https://divisordevoltaje.wikispaces.com/Divisor+de+voltaje](https://divisordevoltaje.wikispaces.com/Divisor+de+voltaje)

Zygo Corporation. (2007). *NewView 600 Specifications*.