



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN
INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN**

**“CREACIÓN DE UN SOFTWARE SIMULADOR PARA EL CONTROL EN
UN SISTEMA DE NANOMÁQUINADO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

MAURICIO ALGALAN MENESES

DIRECTOR:

M. en C. NORMA ANGÉLICA ROMERO BADILLO

MÉXICO, D.F.

AÑO 2014



FES Aragón



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido.

Introducción.....	1
Antecedentes y Planteamiento del problema	1
Justificación	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 1 Historia de la Nanotecnología	4
1.1 La nanotecnología en la UNAM.	9
1.2 Nanoposicionamiento y Estación de Nanoposicionamiento.....	10
1.3 Tipos de estaciones o platinas de desplazamiento nanométricas.	10
1.4 Estaciones de nanodesplazamiento, basadas en el efecto Piezoeléctrico... ..	10
1.5 Funcionamiento básico de las estaciones piezoeléctricas.	12
1.5 Estaciones de Nanodesplazamiento, basadas en el efecto Maglev.	15
1.6 Levitación electrodinámica.....	16
1.7 Levitación electromagnética.	17
1.8 Comparación entre las tecnologías Maglev y Piezoeléctrica.	18
1.9 Los Nanomaquinados	18
1.10 Definición de Nanomaquinado	19
1.11 Herramientas cortantes mecánicas.	20
1.12 Herramientas cortantes por efecto electromagnético.....	20
1.13 El material para los Nanomaquinados.....	21
1.14. Otras formas de crear nanobjetos.....	21
1.14.1 El modelo Arriba-Abajo.....	21
1.14.2 El modelo Abajo-Arriba.....	22
Capítulo 2 Análisis de la estación o platina de nanoposicionamiento modelo 8095 de la empresa New Focus.....	23
2.1 Situación Inicial.....	23
2.2 Desplazamiento de la Estación Cinemática y/o Platina de Nanodesplazamiento.....	24
2.3 Funcionamiento interno de los motores.....	25

2.4 Los motores y grados de libertad de la estación cinemática o platina de nanodesplazamiento 8095.....	25
2.4 Análisis del Software proporcionado de la compañía.....	28
2.5 Programa de diagnóstico.....	28
Capítulo 3 Creación de Software simulador para el control en un sistema de nanomaquinado.....	31
3.1 Requerimientos del cálculo de figuras geométricas.....	31
3.2 Requerimientos del simulador de maquinado.....	33
3.3 Programación.....	34
3.4 Estructura del software simulador.....	35
3.5 Funciones del software simulador.....	36
3.6 Software simulador.....	38
3.7 Interfaz gráfica de usuario.....	39
3.8 Simulador gráfico.....	40
3.9 Cálculo de figuras geométricas.....	41
Capítulo 4 Trabajos futuros.....	42
4.1 Implementación en hardware del software simulador.....	42
4.2 Integración del software con la estación cinemática.....	43
4.3 Configuración de la estación cinemática.....	44
4.4 Sistema de maquinado.....	45
Conclusiones.....	47
Software final.....	47
Resultados del software.....	47
Bibliografía.....	50

Índice de Figuras.

FIGURA I. 1	2
FIGURA I. 2	2
FIGURA I. 3	3
FIGURA 1.1 FULLERENOS.....	4
FIGURA 1.2 CONSTRUCCIÓN PARECIDA A LOS FULLERENOS.....	5
FIGURA 1. 3 NANOTUBO.....	5
FIGURA 1.4 EL SMT.....	6
FIGURA 1.5 THE BEGINING.....	7
FIGURA 1.6 QUANTUM CORRAL.....	7
FIGURA 1.7 DIAGRAMA DEL AFM.....	8
FIGURA 1.8 CUARZO PIEZOELÉCTRICO RECONOCIDO.....	11
FIGURA 1.9.....	11
FIGURA 1.10.....	11
FIGURA 1.11.....	12
FIGURA 1.12.....	12
FIGURA 1. 13	13
FIGURA 1.14.....	13
FIGURA 1.15.....	14
FIGURA 1.16.....	14
FIGURA 1.17.....	15
FIGURA 1.18.....	16
FIGURA 1.19.....	17
FIGURA 1.20.....	17
FIGURA 1.21.....	19
FIGURA 1.22.....	20
FIGURA 1.23.....	20
FIGURA 1.24 MATERIAL DE NANOMAQUINADOS.....	21
FIGURA 1.25.....	21
FIGURA 1.26.....	22
FIGURA 2. 1.....	24
FIGURA 2. 2.....	24
FIGURA 2. 3.....	25
FIGURA 2. 4.....	25
FIGURA 2. 5.....	26
FIGURA 2. 6.....	26
FIGURA 2. 7.....	27
FIGURA 2. 8.....	28
FIGURA 2. 9.....	29
FIGURA 3. 1.....	33
FIGURA 3. 2.....	34

FIGURA 3. 3 TUPA Y LISTA.....	36
FIGURA 3. 4 INDICADOR DE POSICIÓN.....	36
FIGURA 3. 5 PUNTOS MARCADOS.....	36
FIGURA 3. 6 FUNCIONES DEL SOFTWARE.....	36
FIGURA 3. 7 DIAGRAMA DE MARCADO.....	37
FIGURA 3. 8 FUNCIONES DE LÍNEA Y RECTÁNGULO.....	37
FIGURA 3. 9 FUNCIÓN CÍRCULO.....	38
FIGURA 3. 10 SOFTWARE SIMULADOR.....	38
FIGURA 3. 11 INTERFAZ GRÁFICA.....	39
FIGURA 3. 12.....	39
FIGURA 3. 13.....	40
FIGURA 4. 1.....	43
FIGURA 4. 2.....	43
FIGURA 4. 3.....	44
FIGURA 4. 4.....	44
FIGURA 4. 5.....	45
FIGURA 4. 6.....	46
FIGURA C. 1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	47
FIGURA C. 2 EJEMPLOS.....	48
FIGURA C. 3 HEXÁGONO Y CÍRCULO.....	48
FIGURA C. 4 SIMULACIÓN.....	48
FIGURA C. 5 PROCESO DE SIMULACIÓN.....	49

Índice de Tablas.

TABLA 1.....	23
TABLA 2.....	23
TABLA 3.....	27

Agradecimientos

Este es el último paso para convertirme en Ingeniero y quiero agradecer a las personas que hicieron posible llegar a este momento que determina el fin de una etapa en mi vida.

En primer lugar quiero agradecer a mi familia de origen, a mi padre; a mi madre, que ya no está con nosotros; mi hermana y el resto de la familia que aunque pocas veces nos vemos, nos queremos mucho. Sus enseñanzas me han hecho una mejor persona y esas enseñanzas van conmigo siempre.

También quiero agradecer a mi esposa, porque en gran medida esta tesis se debe a su impulso y cariño.

A la familia de mi esposa, que me han aceptado y brindado su cariño, en especial a mis sobrinos por mostrarme lo divertido que es la vida al jugar con ellos.

A todos mis amigos que han estado conmigo, desde aquellos días en que entre a *iniciación universitaria* hasta los de la Universidad, me gusta estudiar, pero ustedes hacían que valiera la pena ir cada día a la escuela. Todas esas aventuras que hemos vivido nos han formado y transformado. Son parte de lo que somos y que a pesar de los tragos amargos seguimos siendo amigos, aunque me gustaría verlos más seguido. A los nuevos amigos, que he ganado con los años, gracias por compartir su tiempo conmigo.

Al jurado, revisores y mi asesora quienes amablemente aceptaron estudiar y revisar el trabajo que hacía. A la Facultad de Estudios Superiores Aragón, a su cuerpo docente, en especial a Luis Ramírez Flores y Marcelo Pérez Medel con los cuales adquirí muchos de los conocimientos que utilizo en la profesión en la que estoy formado.

Finalmente y no por ello menos importante, a la Universidad Nacional Autónoma de México, que me ha formado y cobijado en muchos aspectos, he pasado gran parte de mi vida en ella. Espero que continúe siendo parte de mi formación y por qué no, de los sueños que quiero alcanzar.

Gracias.

Mauricio Algalan Meneses.

Introducción.

La nanotecnología es, desde de la década de los 80's, un campo de estudio de gran interés para muchas instituciones y gobiernos. En el año 2003 Los Estados Unidos de América (EUA) y la Unión Europea [1], invirtieron varios millones de dólares y euros, respectivamente, para financiar investigaciones relacionadas con la nanotecnología. En EUA el desarrollo de la nanotecnología es muy importante, como lo revelan algunos de los documentos oficiales de la oficina presidencial. En el año 2003 llamaban a la nanotecnología “la siguiente revolución industrial” [2] y en años recientes estos mismos documentos llevan como parte de su título la frase “Desarrollo e Investigación liderando una Revolución en Tecnología y la Industria” [3,4].

La idea de la nanotecnología existe desde la década de los 60, dada a conocer por uno de los grandes físicos del siglo XX, Richard Feynman quien fue el primer científico en hablar de algo muy parecido a lo que ahora es la nanotecnología [5]. Sin embargo, fue hasta la década de los 70 que se formalizó esta idea, siendo Norio Taniguchi uno de los primeros científicos en definir el concepto de nanotecnología en 1974 [6].

Definición de Nanotecnología

Taniguchi definió a la nanotecnología como:

“Production technology to get the extra high accuracy and ultra fine dimensions, i.e. the preciseness and fitness on the order of 1nm, (10^{-9} meter in length)” [6]. Es decir *“Tecnología de producción para obtener una alta exactitud y unas dimensiones ultra finas, por ejemplo precisiones en el orden de $1\text{nm} = 1 * 10^{-9}$ metros de longitud”*.

Según la Real Academia de la Lengua Española la nanotecnología es:

“f. Tecnología de los materiales y de las estructuras en la que el orden de magnitud se mide en nanómetros, con aplicación a la física, la química y la biología”.

Antecedentes y Planteamiento del problema.

Planteamiento del Problema

En el laboratorio de Materiales y Sensores perteneciente al área nanotecnológica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico y también al grupo REGINA, existe interés por crear varias aplicaciones de la nanotecnología.

En este laboratorio existe un interés especial por el nanoposicionamiento y las aplicaciones de éste al campo de la nanotecnología. A continuación se enlistan las más importantes:

Nanoposicionamiento: Es la capacidad de un sistema de moverse de una a otra posición en escala nanométrica.

Nanobarrido: Capacidad de un sistema de moverse en un área determinada de una manera sistemática a fin de conocer algunas de sus características.

Automatización de movimientos y nanomaquinados: Capacidad del sistema de hacer nanodesplazamiento en forma automática, esta característica se puede aprovechar para que, junto con otros dispositivos, realice nanomaquinados.

El laboratorio cuenta con diversos equipos que pueden realizar nanoposicionamiento como la estación cinemática 8095 de la empresa New Focus.

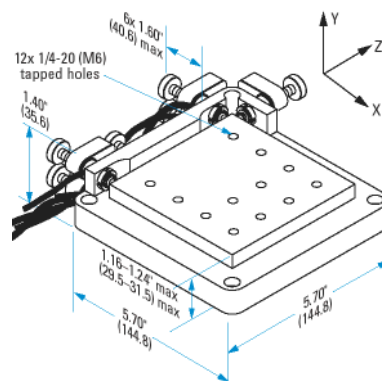


Figura I. 1

Este dispositivo tiene la capacidad de moverse en pasos inferiores o iguales a 30nm y dispone de 6 motores que permiten realizar movimientos en 6 grados de libertad. Su funcionamiento se controla desde la computadora, la cual se conecta a unos dispositivos controladores y éstos a la estación o platina (Figura 2.2).

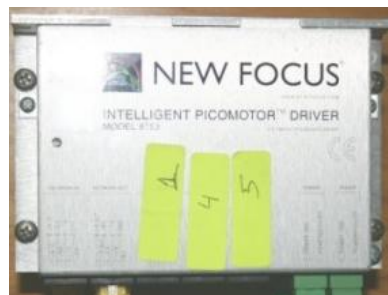


Figura I. 2

Justificación

El control de la estación cinemática o la platina de nanodesplazamiento se logra actualmente con un programa proporcionado por la propia compañía (Figura 2.3). Aunque con este programa se puede lograr mover los motores de la platina es muy difícil llegar a tener un control real de la misma y se dificulta el control.

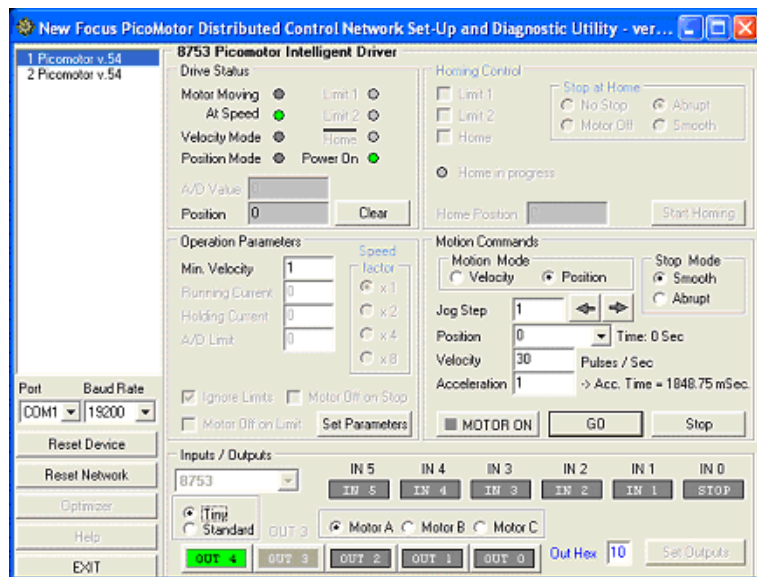


Figura I. 3

Por lo que la primera parte de este proyecto va enfocada a generar un simulador que pueda mejorar el control de nanodesplazamiento no solo del equipo mencionado anterior, si no lograr que este simulador pueda ser usado para:

1. Independizar la implementación del hardware de nanomaquinado de su software.
2. Crear rutinas de maquinado.
3. Crear bibliotecas o librerías para otros sistemas de maquinado.

Objetivo General

- Creación de Software simulador para el control en un sistema de nanomaquinado.

Objetivos Específicos

- Modularizar el software simulador.
- Determinar la viabilidad de simular, antes de implementar un control a un equipo de maquinado.

Capítulo 1 Historia de la Nanotecnología.

La primera referencia que se tiene acerca de la posibilidad de manipular objetos que tengan unos cuantos nanómetros de longitud es del famoso científico estadounidense Richard Feynman, quien en su conferencia del 29 de Diciembre de 1959 “There’s Plenty of Room at the Bottom” sentó las bases para lo que ahora es la nanotecnología [5].

En dicha conferencia, utiliza el ejemplo de cómo la Enciclopedia Británica pudiera ser completamente escrita en la cabeza de un alfiler si se tuviera la capacidad de mover objetos tan pequeños como los átomos.

Durante esta conferencia Feynman declaró: “En el año 2000 cuando se vuelva atrás en esta época se preguntaraán porqué no hubo nadie hasta el año 1960 que se moviera en esta dirección”, seguramente nadie lo había pensado antes.

La nanotecnología se ha desarrollado desde entonces, aunque por un tiempo el hecho más importante que ocurrió fue cuando Taniguchi definió la palabra nanotecnología, pues fue hasta 1980 que se lograron hechos importantes.

En 1981 se inventa el Microscopio de Efecto Túnel [7] (STM por sus siglas en inglés) y en 1986 se da a conocer la invención del Microscopio de Fuerza Atómica [8] (AFM por sus siglas en inglés), ambos capaces de obtener imágenes de distintos materiales en escala nanométrica como en [9]. Este tipo de instrumentos son utilizados ampliamente en la nanotecnología.

La nanotecnología empieza abarcar otras áreas de la investigación científica como la química, siendo una de las principales aportaciones los Fullerenos, que son arreglos de átomos de carbono extremadamente grandes (60 átomos o más), descubiertos por Halod Kroto en 1985 [10], en la Figura 1.1 se muestra un arreglo de este tipo de moléculas [11].

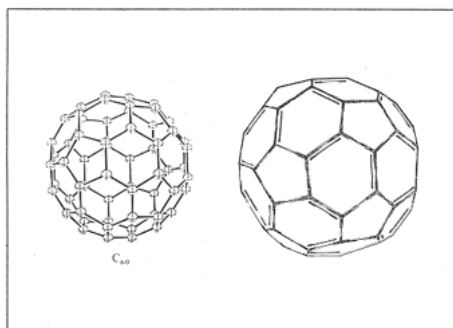


Figura 1.1 Fullerenos.

El investigador Harold Kroto originalmente investigaba el comportamiento de los átomos de carbono en el espacio, en un experimento de simulación de la química producida por una estrella gigante roja encontró moléculas de carbono de 60

átomos en un arreglo combinado de hexágonos y pentágonos; a esta molécula se le llamo Buckmisterfullerene en honor del arquitecto Robert Buckmister Fuller quien construyó domos geodésicos utilizando figuras similares [10], en la Figura 1.2 podemos ver una de estas construcciones [11].

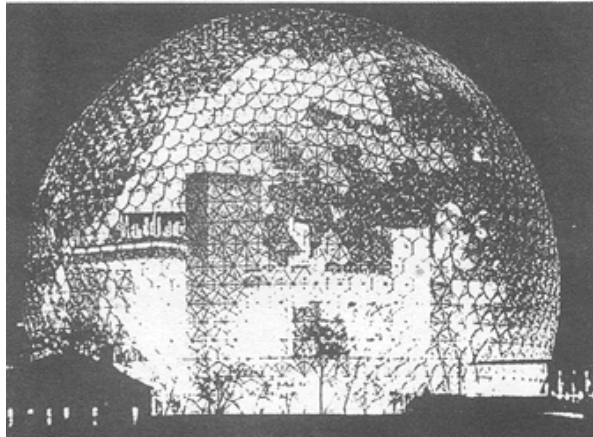


Figura 1.2 Construcción parecida a los Fullerenos.

Este tipo de moléculas son investigadas actualmente para producir lubricantes, materiales resistentes y hasta superconductores [10, 12]. Algunas de estas aplicaciones se logran mediante los nanotubos [10] (Figura 1.3) que son la unión de varios fullerenos en una especie de tubo más largo que dependiendo de los materiales utilizados y su forma permite obtener distintas aplicaciones [10, 12, 13].

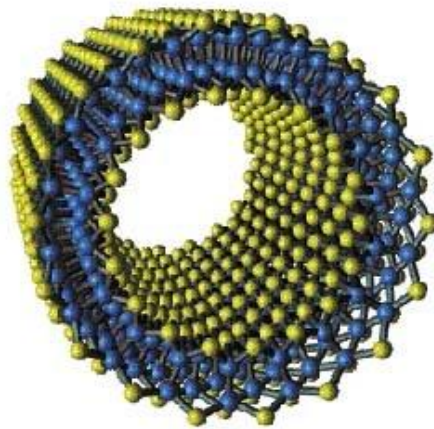


Figura 1. 3 Nanotubo.

En 1986 Erick Drexler presenta su libro llamado “Las Máquinas de la Creación” [14,15] que expone las aplicaciones de la nanotecnología. En ese año los creadores del STM, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer obtienen el premio Nobel a tan

solo unos años de que se inventara, siendo esto un reconocimiento a la importancia de este invento en el desarrollo de la ciencia.

Para 1989 se logra por primera vez mover un átomo mediante el STM, actualmente se sigue utilizando en la nanotecnología como una poderosa herramienta para observar y manipular átomos y/o moléculas [16].

La manipulación individual de átomos, y con ello una parte muy importante de la nanotecnología empezó de manera accidental, en septiembre de 1989, Erhard Schweizer y Don Eigler estudiaban el comportamiento de átomos de xenón en una superficie de platino cuando notaron que la punta del STM inducía el movimiento en los átomos de Xenón [17].

El STM funciona mediante la utilización de una punta ultra-fina (también llamada cantilever) para realizar el sensado del material o la muestra, esta punta o cantilever es buena conductora de electricidad [18]. Para obtener una imagen, el STM sensa parte por parte el material con la punta o cantilever, dicha punta o cantilever se acerca a la muestra del material hasta una distancia dada en la que se establece una corriente de “túnel”. Al medir esta corriente se obtiene la imagen de la muestra.

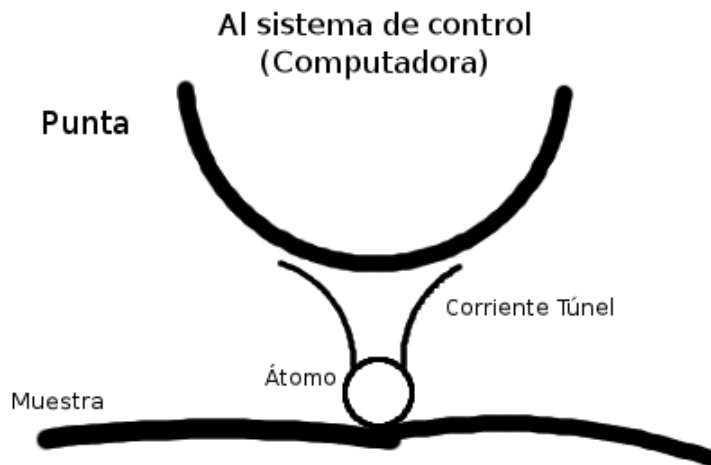


Figura 1.4 El SMT.

El sensado de la muestra y el movimiento de átomos depende de la distancia entre la punta del STM y la muestra, si la punta del STM se acerca lo suficiente mueve los átomos de la muestra [17].

El primer experimento para mover un átomo de xenón consistió en encontrar un átomo de xenón aislado en una superficie de níquel, una vez localizado se movió

la punta del STM directamente al átomo y se redujo la distancia entre la punta y dicho átomo, la punta nuevamente se movió a otra localización donde nuevamente se aumento la distancia entre ésta y el átomo, al volver a mostrar la imagen de la superficie donde se localizó al átomo en un principio se comprobó que dicho átomo se movió a la posición designada [17].

En las siguientes imágenes (Figura 1.5, 1.6) se muestran los primeros logros moviendo átomos con el STM; la primera imagen fue publicada en la revista *Nature* [19] (1.5) y la segunda en la revista *Science* [20] (1.6) ambas desarrolladas por el centro de investigación de IBM Almaden.

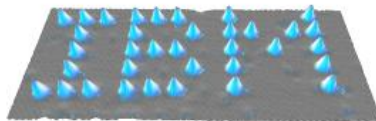


Figura 1.5 The Beginning.

A partir del descubrimiento de que con el STM se podía modificar la muestra además de observarla, se continuaron haciendo investigaciones de cómo manipular distintos objetos en la escala nanométrica, pronto se observó que también se podía lograr con el AFM como en [21].

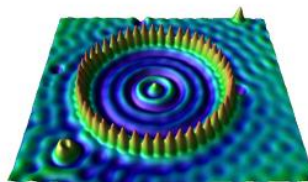


Figura 1.6 Quantum Corral.

Una ventaja del AFM sobre el STM es que no necesita de un ambiente al vacío, puede ser utilizado también en ambientes líquidos a distintas temperaturas y se utiliza en las áreas de la biología, química, física y en la industria de los semiconductores [22].

En contraste, el STM sólo puede trabajar con materiales que tengan una buena conducción eléctrica limitando mucho su utilización en otro tipo de materiales [22],

otra de sus desventajas es la temperatura a la que trabaja, 269 grados centígrados bajo cero, para evitar que el material con el que se trabaja salte de un lugar a otro debido a un aumento de temperatura [17].

El AFM funciona manteniendo constante una pequeña fuerza entre la punta o cantilever y la muestra, un rayo láser se envía al cantilever que mediante un pequeño objeto reflejante envía dicho rayo a un fotodetector, el cual detecta las pequeñas variaciones del láser, un sistema de control mantiene constante la distancia entre la muestra y el cantilever, la fuerza repulsiva resultante es guardada y convertida en una imagen análoga [22]. En la Figura 1.7 se muestra un diagrama del funcionamiento básico del AFM.

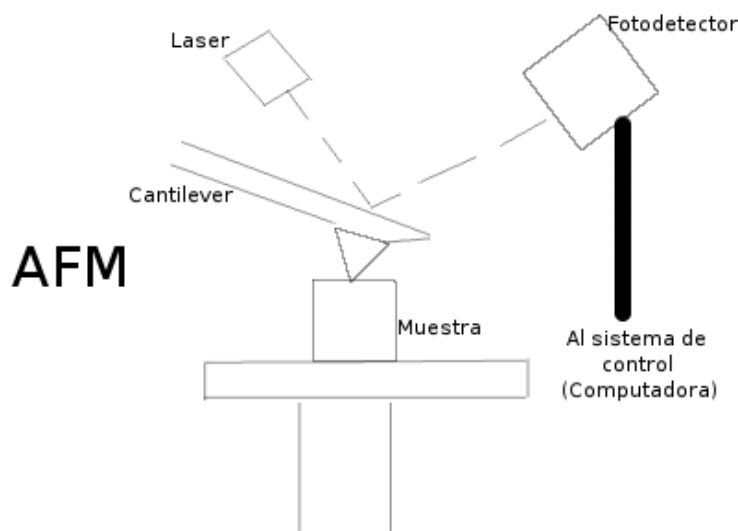


Figura 1.7 Diagrama del AFM.

Al igual que con el STM, la distancia entre el cantilever y la muestra es fundamental para lograr la nanomanipulación, en este caso en vez de moverse un átomo, se hacen surcos u hoyos sobre una superficie de material [21].

La posibilidad de manipular objetos a una escala tan pequeña ha hecho de la nanotecnología una herramienta para otras disciplinas y creado nuevas áreas de conocimiento, un ejemplo de esto es la síntesis química [23] y la biotecnología en escala nanométrica [14, 24]. Ambas disciplinas buscan obtener diversos objetos de tamaño nanoscópico [24, 25], la nanotecnología también utiliza métodos de las dos anteriores técnicas para obtener resultados [25, 26].

Estos son algunos de los hechos más importantes que forman parte de la historia de la nanotecnología, aunque el verdadero potencial de la nanotecnología aún se está desarrollando, en la actualidad varios productos ya están utilizando tecnologías derivadas de la nanotecnología.

Muchos de estos desarrollos los utilizamos todos los días en forma de chips, la industria de los semiconductores actualmente implementa los avances de la nanotecnología en sus productos [27]. En 2011 se presentó un artículo, en el cual

los investigadores buscan crear circuitos lógicos hechos con unos cuantos átomos[28].

La nanotecnología cambiará nuestra forma de vida, desde la ropa que será más resistente [29], hasta en la salud, con la llamada Nanomedicina que busca crear nanodispositivos para diagnosticar y curar enfermedades de manera autónoma [30]. Actualmente la UNAM ha creado un grupo académico en especial dedicado a realizar diversas actividades con el fin de aumentar el conocimiento dentro de esta área.

1.1 La nanotecnología en la UNAM.

La UNAM realiza investigaciones en la escala nanométrica desde hace varios años [31]. Durante mucho tiempo las investigaciones en materia de nanotecnología se hicieron sin que hubiera coordinación alguna, por lo que existen pocos registros de qué investigaciones se hicieron antes del año 2000.

A partir del año 2000 los diferentes institutos y centros que realizan investigación en nanotecnología comienzan a coordinarse y finalmente en el año 2003 crean un mecanismo de cooperación, la RED de Grupos de Investigación en NANociencias (REGINA) [31].

REGINA se reunió por primera vez el 29 de abril del 2004; asistieron investigadores y autoridades, los cuales invitaron a todo grupo perteneciente a la UNAM y que estuviera interesado en el tema a que se unieran a este proyecto.

Estas son algunas de las áreas que se investigan a través del grupo REGINA [32]:

1. Síntesis y caracterización

- Propiedades ópticas de Sólidos
- Cerámicas y Películas Delgadas Ferroeléctricas
- Síntesis de nanopartículas por métodos coloidales
- Formación y Caracterización de películas ultra delgadas
- Propiedades ópticas de nanoestructuras de impurezas en cristales inorgánicos
- Películas delgadas nanoestructuradas: Usadas en fotodegradación y ahorro de energía
- Orden atómico local en nanocristales
- Caracterización Estructural por Técnicas de Microscopía Electrónica de Sistemas
- Sistemas nanoestructurados con aplicación en catálisis
- Estructura y organización en fluidos complejos
- Nanofotónica de Geles

2. Teoría y Simulación

- Optical Properties of Nanoparticles (Propiedades ópticas de nanopartículas)
- Física Computacional de Nanomateriales
- Nanomáquinas y heteroestructuras
- Propiedades ópticas de nanopartículas coloidales y nanocompositos
- Propiedades Catalíticas de Nanoestructuras
- Nanobiología
- Nanoestructuras desordenadas
- Química computacional de nanomateriales
- Nanomagnetismo y espintrónica
- Interacción de luz con superficies y nanoestructuras

1.2 Nanoposicionamiento y Estación de Nanoposicionamiento.

El posicionamiento de acuerdo con la Real Academia de la Lengua es “la acción o efecto de posicionar”, es decir de tomar posición. Aplicando esto a la nanotecnología tenemos que el nanoposicionamiento es la “la acción o efecto de posicionar en la escala nanométrica, es decir moverse o tomar alguna posición con resolución nanométrica.”

1.3 Tipos de estaciones o platinas de desplazamiento nanométricas.

Las estaciones o platinas de desplazamiento nanométrico, son aparatos que cumplen la función de moverse de un punto a otro del espacio en escala nanométrica.

Para poder realizar los movimientos a la escala requerida se utilizan básicamente dos técnicas, las estaciones nanométricas basadas en actuadores piezoeléctricos o piezoactuadores y las estaciones basadas en la levitación magnética (maglev).

1.4 Estaciones de nanodesplazamiento, basadas en el efecto Piezoeléctrico.

Para realizar nanodesplazamiento muchas estaciones de nanodesplazamiento basan su funcionamiento en materiales piezoeléctricos y en los llamados actuadores piezoeléctricos.

Se dice que un material es piezoeléctrico o presenta el efecto piezoeléctrico cuando genera o se presenta en él una carga eléctrica; cuando está sujeto a una fuerza mecánica; y/o cambia de forma (se tensa) cuando se le aplica un campo eléctrico (también llamado efecto piezoeléctrico inverso) [33].

Una de las características más importantes acerca de los materiales piezoeléctricos, es que producen una fuerza significativa y un desplazamiento pequeño, algunos investigadores reportan que han podido generar una fuerza

capaz de mover 120Kg [33]. En la Figura 1.8 se muestra uno de los materiales piezoeléctricos más conocidos: el cuarzo.



Figura 1.8 Cuarzo piezoeléctrico reconocido.

La Figura 1.9, muestra un material piezoeléctrico sin estar sujeto al efecto piezoeléctrico y conectado a un voltímetro, el material está en posición A. El voltímetro registra una lectura A1.

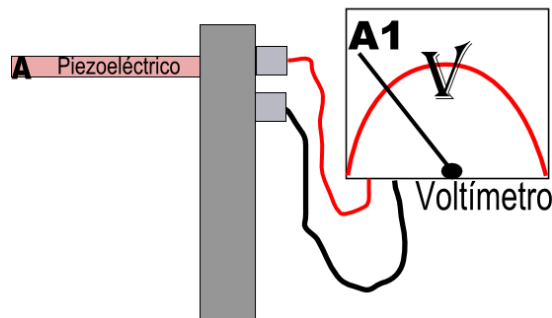


Figura 1.9

En la Figura 1.10 al material se le ejerce una fuerza F , el voltímetro cambia de lectura (hasta B1) indicando que hubo un cambio de voltaje debido a que la fuerza F deformó el material piezoeléctrico hasta la posición B. Es decir que al deformar un material que sea piezoeléctrico éste generara una carga eléctrica.

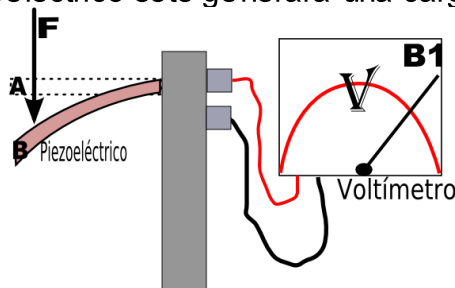


Figura 1.10

A este tipo de comportamiento se le llama *efecto piezoeléctrico directo* y cualquier material que presente este efecto se le llama *material piezoeléctrico*. En la Figura 1.11 se muestra nuevamente un material piezoeléctrico, pero esta vez está conectado a un circuito eléctrico que se encuentra abierto y mide A.

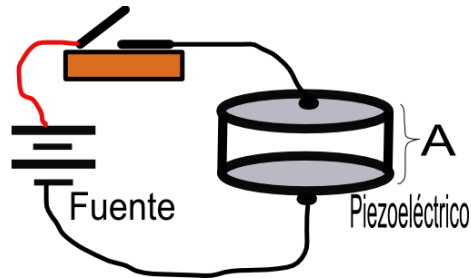


Figura 1.11

Al cerrar el circuito eléctrico el piezoeléctrico cambia de forma o se deforma hasta alcanzar un tamaño B. Esta vez, el campo eléctrico fue el que deformó el material. En la Figura 1.12 se muestra lo que le sucede al material al cerrar el circuito. A este efecto se le conoce como *efecto piezoeléctrico inverso*.

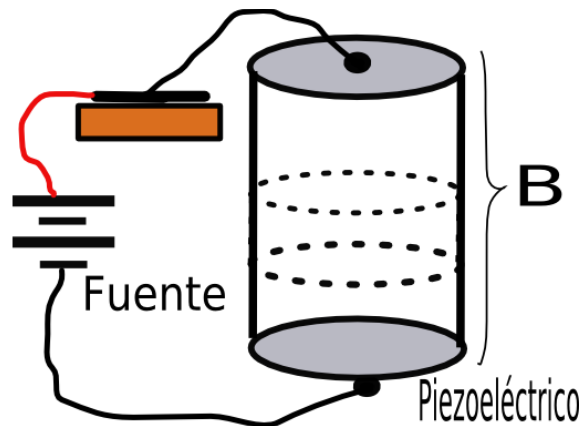


Figura 1.12

1.5 Funcionamiento básico de las estaciones piezoeléctricas.

Las estaciones de nanodesplazamiento piezoeléctricas utilizan de diferentes formas el efecto piezoeléctrico para lograr su objetivo, las más utilizadas son:

1. Mediante actuadores tipo “Pila”.
2. Mediante actuadores tipo “Flexure”.
3. Por “Mecanismos de impacto”.
4. Por “Mecanismos de fricción”.

Funcionamiento mediante actuadores tipo “Pila”. Básicamente son dispositivos que contienen materiales piezoeléctricos dispuestos en forma de pila [34], y transmiten directamente el movimiento mecánico producido por el efecto piezoeléctrico inverso.

Su funcionamiento es sumamente sencillo, simplemente se varía un voltaje dado para que se produzca el nanodesplazamiento, como se muestra en la Figura 1.13, el objeto se desplaza de A a B variando el voltaje.

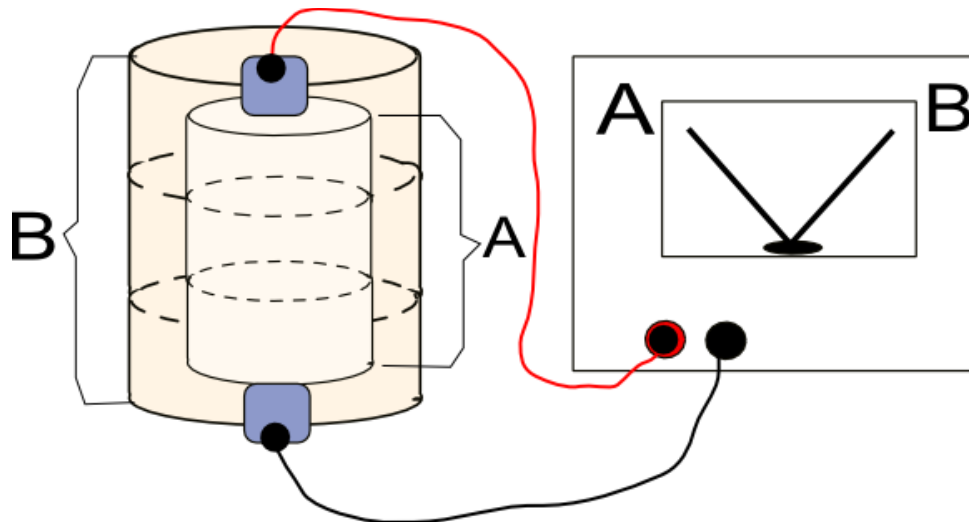


Figura 1. 13

Funcionamiento mediante actuadores tipo “Flexure”. Los actuadores tipo flexure, son dispositivos que producen el nanodesplazamiento de un objeto por la transmisión mecánica del movimiento que produce el efecto piezoeléctrico inverso mediante palancas, resortes y bisagras de flexión (en inglés “flexure hinge”) a dicho objeto [35], en la Figura 1.14 se puede ver un diagrama de uno de estos dispositivos.

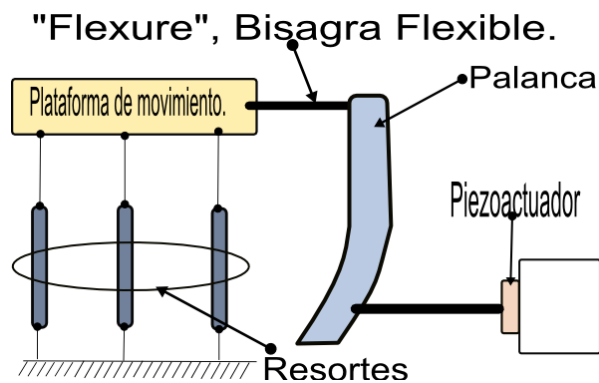


Figura 1.14

Funcionamiento por “Mecanismos de impacto”. Se les llama así a los mecanismos que utilizan la fuerza de fricción y la fuerza de inercia causada por rápidas deformaciones de un material piezoeléctrico para producir movimiento [36]. En la Figura 1.15 y en la Figura 1.16 se observa el funcionamiento de uno de estos mecanismos.

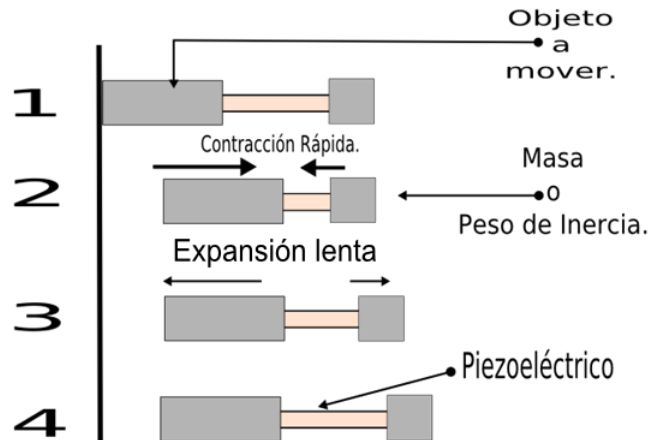


Figura 1.15

Controlando la velocidad y el orden de las deformaciones que sufre el material piezoeléctrico es como se producen los distintos movimientos del mecanismo [36].

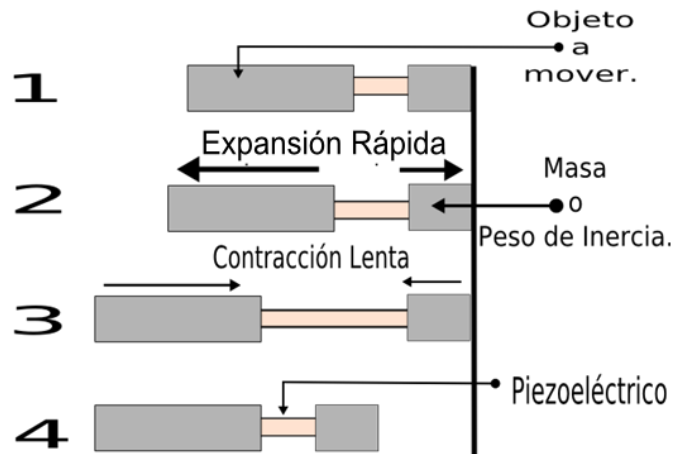


Figura 1.16

El funcionamiento de un motor piezoeléctrico de “Mecanismos de fricción” utiliza el mismo principio físico que utilizan los magos al quitar un mantel de la mesa sin mover los platos puestos en ella. El objeto a mover se coloca sobre el material piezoeléctrico [37], si el piezoeléctrico se mueve rápidamente el objeto permanece en su lugar, si el movimiento es lento, se mueve junto con el piezoeléctrico.

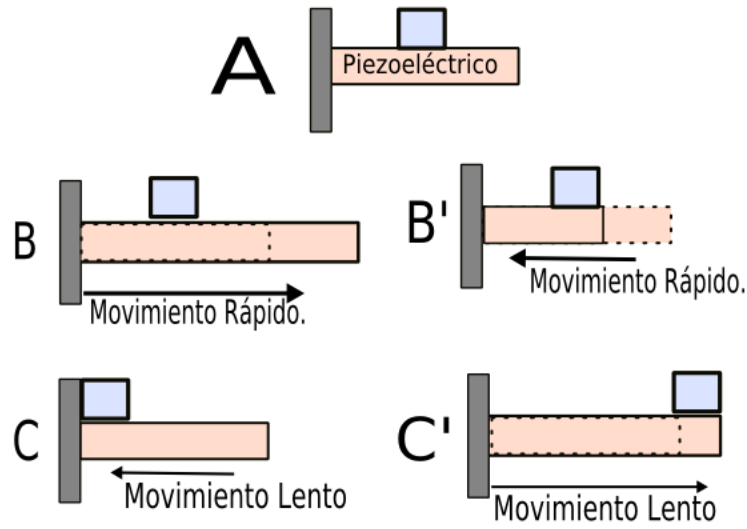


Figura 1.17

Controlando la velocidad y el orden de la expansión o contracción del piezoeléctrico es la dirección del movimiento [37]. En la Figura 1.16 el estado A es el estado original del material (reposo), dependiendo de la dirección se hace una contracción o expansión rápida (estado B o B'); finalmente se hace un movimiento contrario al anterior pero lentamente (estado C o C').

1.5 Estaciones de Nanodesplazamiento, basadas en el efecto Maglev.

Para realizar nanodesplazamiento, también se pueden aprovechar las propiedades magnéticas de diversos elementos electromagnéticos mediante la levitación magnética [38–40].

Existen 3 maneras de levitar un objeto:

1. Sustentación por imanes permanentes.
2. Levitación electrodinámica.
3. Levitación electromagnética.

Levitación mediante sustentación por imanes permanentes.

Como su nombre lo indica se utilizan imanes permanentes, arreglados uno junto a otro, con el fin de producir fuerzas que repelan y sustentan un objeto [41]. En la Figura 1.18 se muestra un esquema de cómo funciona esta tecnología.

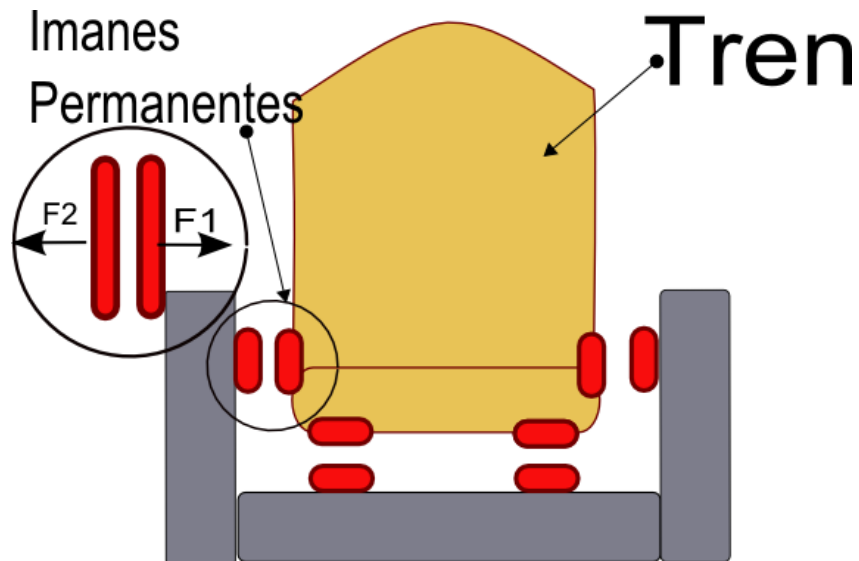


Figura 1.18

Para sustentar el tren, es necesario colocar imanes permanentes abajo del tren u objeto a levitar y por encima del riel, y para guiarlo es necesario colocar imanes a los lados del tren u objeto; las fuerzas F_1 y F_2 , son opuestas y alejan a los imanes, los imanes de la parte de abajo contrarrestan la fuerza de gravedad levitando el objeto y los imanes de los lados guían al tren.

Debido a que para mover trenes esta tecnología es muy costosa se dejó de desarrollar en el transporte masivo [41].

Para otros usos y para el diseño de estaciones o patinas de nanoposicionamiento esta tecnología todavía es utilizada [42].

1.6 Levitación electrodinámica.

Basa su funcionamiento en crear una fuerza repulsiva que pueda levantar un objeto, al tren u objeto se le colocan bobinas electromagnéticas superconductoras y los rieles del tren u objeto a levitar son hechos de aluminio.

Al magnetizar las bobinas, estas generan corrientes indeseables llamadas “eddy” sobre los rieles de aluminio y sobre las mismas bobinas, generando que se cree una fuerza repulsiva que levanta el objeto [43]. En la Figura 1.19 se muestra un diagrama de cómo funciona esta forma de levitación magnética.

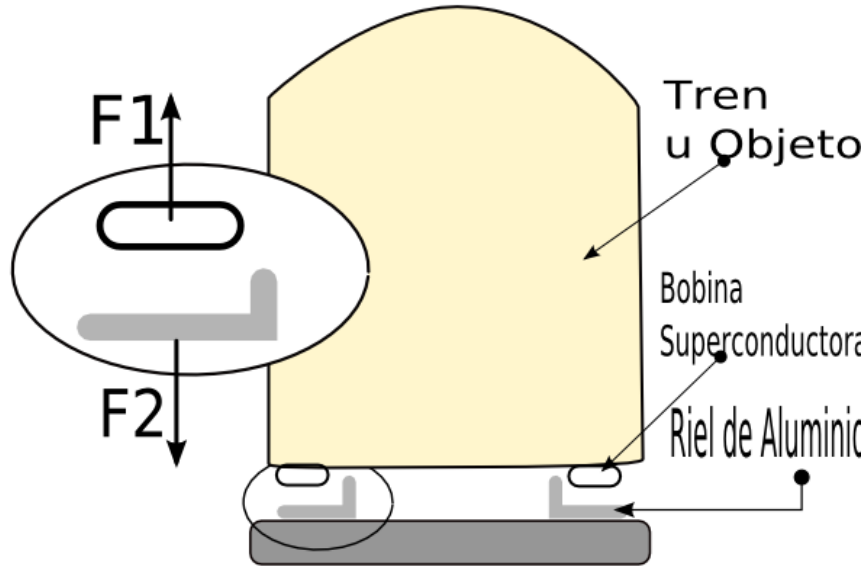


Figura 1.19

En la Figura 1.18 se ve como las fuerzas F1 y F2 son contrarias, levantando al tren, con este tipo de tecnología la guía del tren la hace los mismos rieles.

1.7 Levitación electromagnética.

Su funcionamiento está basado en la atracción magnética, se utilizan fuerzas atractivas electromagnéticas, se colocan electroimanes en el vehículo u objeto y armaduras ferromagnéticas a lo largo de la vía [41]. En la Figura 1.20 se muestra su funcionamiento.

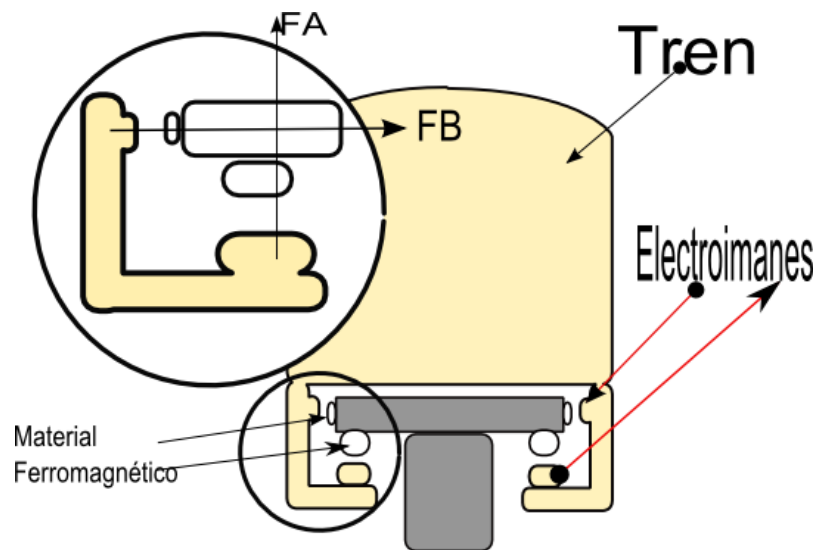


Figura 1.20

Los electroimanes son atraídos hacia al material electromagnético, haciendo que el tren entero se levante hacia arriba, levitándolo, mediante la fuerza FA que contrarresta a la de la gravedad, la fuerza FB atrae al tren hacia la vía, pero como del otro lado se encuentra una fuerza en sentido contrario, se contrarrestan y sirven como guía para el tren.

1.8 Comparación entre las tecnologías Maglev y Piezoeléctrica.

Cada tecnología ofrece características diferentes a las platinas de nanodesplazamiento, dependiendo de las necesidades que uno tenga, una tecnología es mejor que otra.

Características de la tecnología Maglev.

- El sistema está prácticamente libre de fricción [38].
- La resolución y repetitividad son mejores debido a la ausencia de fricción [38].
- Permite manejar la estación sin la necesidad de lubricantes [39].

Características de la tecnología Piezoeléctrica.

- Puede mover gran peso [33].
- Produce desplazamientos muy pequeños [33].

Otro tipo de Estaciones o Platinas de Nanodesplazamiento.

Existen investigaciones para crear dispositivos de nanodesplazamiento con otras técnicas, aparte de las antes mencionadas, por ejemplo, los motores ultrasónicos como en [44]; aunque la mayoría son basadas en las tecnologías maglev y en materiales piezoeléctricos. Aplicaciones para las estaciones de nanodesplazamiento: La mayoría de las aplicaciones que se le dan a las estaciones consiste en crear sistemas que complementen o interactúen con los microscopios STM y AFM [33, 38–40], el objetivo de este trabajo es tener un instrumento similar y poder desarrollarlo significativamente.

1.9 Los Nanomaquinados

La nanotecnología tiene como uno de sus principales objetivos el estudio y la creación de objetos en la escala nanométrica. Para crear objetos de este tamaño existen diversos métodos y técnicas con las cuales se pueden obtener. Una de las más importantes es la técnica de nanomaquinado.

1.10 Definición de Nanomaquinado

En el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, el término maquinar es “en metalurgia, trabajar una pieza por medio de una máquina”.

Si extrapolamos el término maquinar a la nanotecnología, es decir nanomaquinar, tendríamos que es “trabajar una pieza por medio de una máquina en escala nanométrica”, siendo el nanomaquinado el “objeto obtenido por la acción de maquinar”.

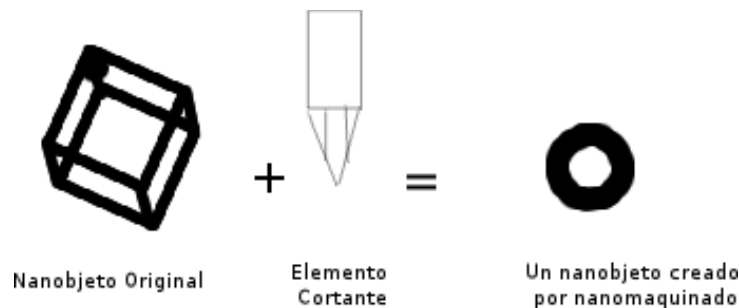


Figura 1.21

El nanomaquinado consiste en crear nuevos nanobjetos a partir de devastar un nanobjeto o material más grande mediante un elemento cortante. La tecnología de nanomaquinados está inspirada en otras más antiguas que son los maquinados y micro-maquinados que crean nuevos objetos a partir de otros más grandes ya sea en la escala macroscópica (maquinados) o en la microscópica (micromaquinados).

Las partes básicas de un nanomaquinado son:

1. Un elemento cortante.
2. Un material o nanobjeto a desgastar.

El elemento cortante para el nanomaquinado es la herramienta con la que se desgasta el material y se le da forma al nuevo nanobjeto.

Todos los maquinados, desde el macroscópico hasta el nanoscópico, basan su funcionamiento en una herramienta que corta y/o desgasta cierto tipo de materiales con los cuales se busca construir un nuevo objeto.

En la nanotecnología existen básicamente dos formas de herramientas cortantes:

1. Herramientas cortantes mecánicas.
2. Herramientas cortantes por efecto electromagnético.

1.11 Herramientas cortantes mecánicas.

Las herramientas cortantes mecánicas hacen el desgaste y/o el corte del material mediante el esfuerzo mecánico que realiza la propia herramienta sobre el material (Figura 1.22).

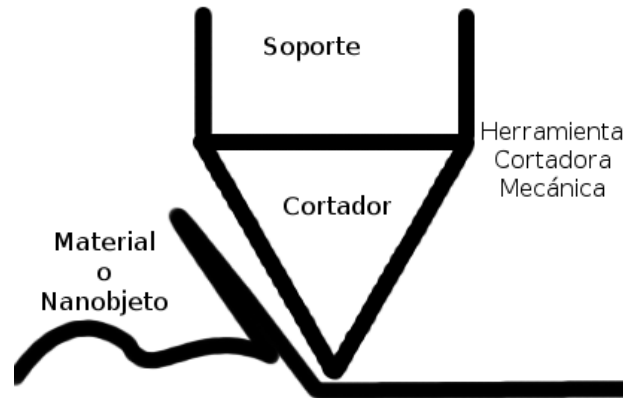


Figura 1.22

Las herramientas de corte mecánicas para nanomaquinado son hechas de materiales muy duros, debido al desgaste que sufren materiales más suaves al realizar los nanomaquinados [21], uno de los materiales más utilizados es el diamante [21].

1.12 Herramientas cortantes por efecto electromagnético.

Son herramientas cortantes por efecto electromagnético aquellas que desgastan un material utilizando las propiedades del efecto o espectro electromagnético (Figura 1.23).

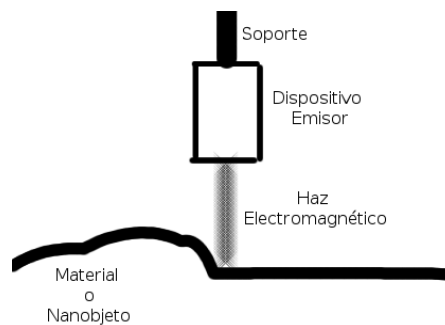


Figura 1.23

El haz de las herramientas cortantes por efecto o espectro electromagnético interactúa de dos formas con el material, mediante radiación electromagnética (ejemplo los fotones) o por partículas cargadas (ejemplo los electrones) [45].

1.13 El material para los Nanomaquinados.

El material para realizar los nanomaquinados es bastante diverso, incluye los metales, películas de polímeros, superficies rígidas de semiconductores [21], así como también materiales duros y frágiles como la solución del silicio [46] o el cristal [47] pueden ser utilizados como materia prima en los maquinados de alta precisión o nanomaquinados. Todo material en estado sólido que pueda ser desgastado de forma mecánica o por algún efecto electromagnético, concentrado en un pequeño punto o haz, puede ser nanomaquinado.

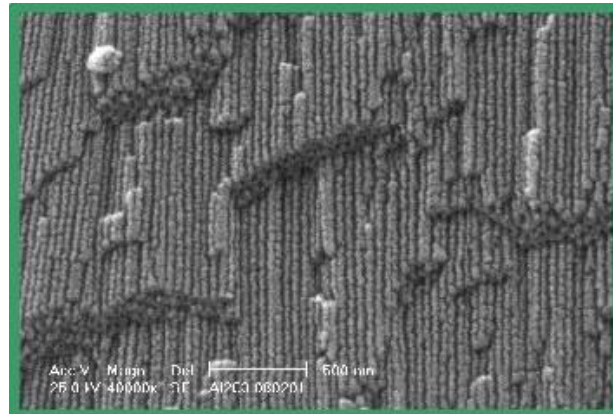


Figura 1.24 Material de nanomaquinados.

1.14. Otras formas de crear nanobjetos.

Los nanomaquinados es una de varias formas de crear nanobjetos. Dependiendo de que nanobjeto se quiera obtener o de los componentes del mismo se utilizan una u otra técnica o técnicas de creación u obtención de nanomaquinados. La nanotecnología clasifica estas técnicas en dos modelos teóricos, el modelo Arriba-Abajo, en inglés Top-Down, y el modelo Abajo-Arriba, Bottom-Up.

1.14.1 El modelo Arriba-Abajo.

Consiste en crear un nuevo nanobjeto a partir de otro mucho más grande que éste, el cual se desgasta hasta obtener el nanobjeto deseado. Un ejemplo de este modelo en la escala macroscópica es la creación de una escultura (Figura 1.25).

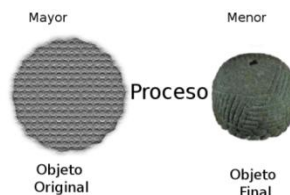


Figura 1.25

El ejemplo más común con el cual se producen nanobjetos con este método es la fabricación (y constante miniaturización) de los semiconductores [16]. En el objeto más grande (ejemplo las obleas de semiconductores), se forman nanoestructuras utilizando litografía, otros nanobjetos también se obtienen combinando la litografía así como el ataque químico o herramientas de corte muy precisas [16], el nanomaquinado también puede considerarse parte de este modelo.

1.14.2 El modelo Abajo-Arriba.

En el modelo Abajo-Arriba los nuevos nanobjetos se crean a partir de los componentes más simples, es decir se empieza por la pieza más pequeña y se termina con la pieza y/o parte más grande. El mejor ejemplo de este modelo en la escala macroscópica es la construcción de castillos o edificios, ya que a partir de piezas pequeñas (ladrillos, arena, cemento, grava, etc.) se construye el complejo deseado (Figura 1.26).

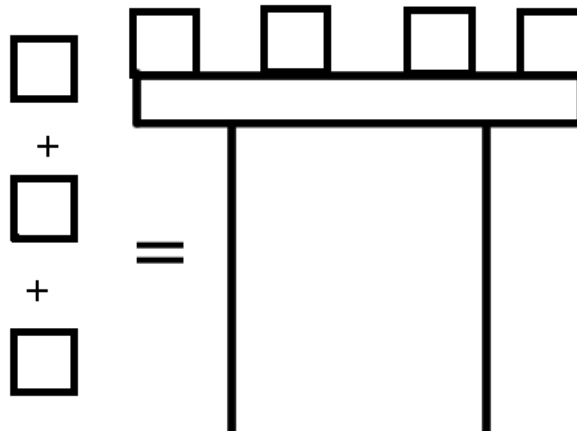


Figura 1.26

Capítulo 2 Análisis de la estación o platina de nanoposicionamiento modelo 8095 de la empresa New Focus.

Se busca crear un sistema que pueda simular el comportamiento de la estación de nanoposicionamiento 8095, para tal fin hay que mostrar algunas de las características de dicho dispositivo.

Cabe destacar que la compañía que fabrica el dispositivo tiene muy poca información al respecto y el contenido de este capítulo fue el resultado de consultar repetidamente su manual[48].

2.1 Situación Inicial.

Se cuenta con la *estación o platina de nanoposicionamiento modelo 8095* de la empresa New Focus, que tiene las siguientes características:

Características	
Estilo	Alineación por 6 motores
Ejes motorizados	6
Grados de libertad	6 (X, Θ X, Y, Θ Y, Z y Θ Z)
Viaje lineal	Aprox. 3mm
Viaje angular	Aprox. 4°
Movimiento mínimo	X, Y, Z \leq 30nm
Resolución angular	\leq 0.2 μ rad
Carga máxima	Aprox. 2kg (5 libras)

Tabla 1

Para que la estación o platina de nanodesplazamiento se controle desde la computadora se cuenta con *2 controladores del modelo 8753* de la misma compañía (New Focus), con las siguientes características:

Características	
Número de canales	3
Número de canales activos a la vez	1
Frecuencia máxima	2kHz
Puerto de comunicación	Ethernet ó RS-232
Consumo de energía	17 Watts

Tabla 2

2.2 Desplazamiento de la Estación Cinemática y/o Platina de Nanodesplazamiento.

La platina de nanodesplazamiento o estación cinemática 8095 tiene 6 grados de libertad, de los cuales 3 son los ejes X, Y y Z y los 3 restantes son los respectivos movimientos angulares en dichos ejes, es decir Θ_X , Θ_Y y Θ_Z .

En la Figura 1.2, se muestra cómo la compañía asignó los ejes a la platina de nanodesplazamiento o estación cinemática 8095.

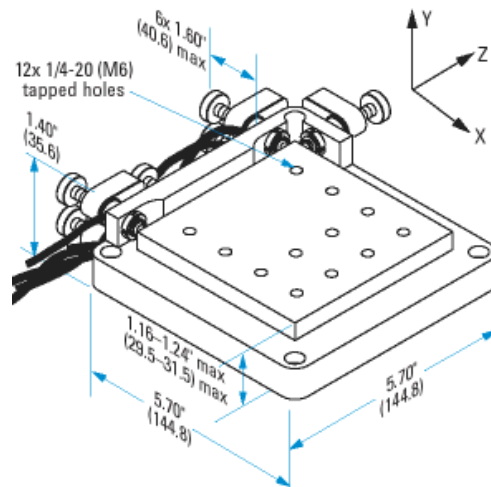


Figura 2. 1

Para facilitar la labor de diseño, los ejes se cambiarán de posición como lo muestra la Figura 2.2

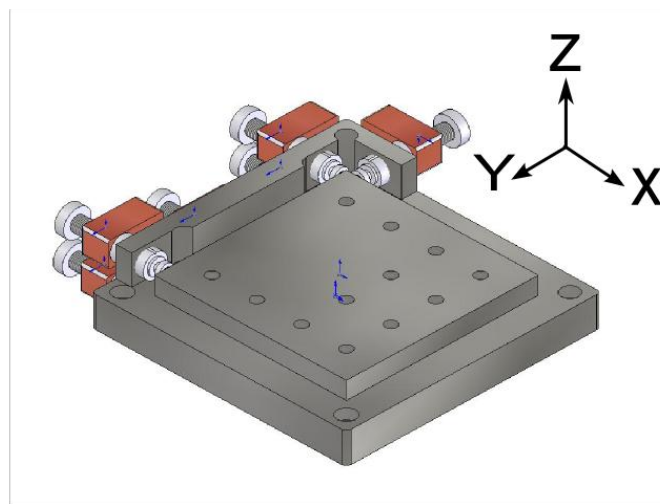


Figura 2. 2

2.3 Funcionamiento interno de los motores.

Los motores de la estación cinemática o platina de nanodesplazamiento 8095 funcionan utilizando el efecto piezoeléctrico mediante una variación de los “*mecanismos de fricción*”. En los motores de la 8095, el material piezoeléctrico está conectado a unas “mandíbulas” que hacen girar unos tornillos especialmente diseñados para moverse en cantidades muy pequeñas[1]; de manera similar a como se describió en el capítulo 1 al generar movimientos rápidos el tornillo permanece en la misma posición y si son lentos gira. En la Figura 2.3 se muestra un diagrama de los motores.

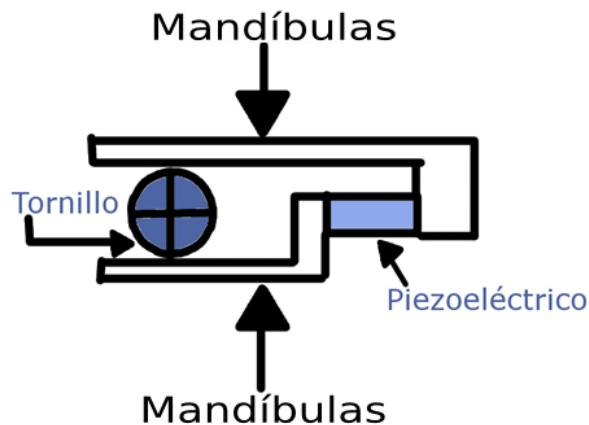


Figura 2.3

2.4 Los motores y grados de libertad de la estación cinemática o platina de nanodesplazamiento 8095.

Aunque la platina cuenta con 6 motores y 6 grados de libertad; únicamente un grado de libertad tiene asignado un motor, para los demás grados de libertad se deben hacer movimientos en 2 ó 3 motores. En la Figura 1.5 se muestra la disposición de los motores.

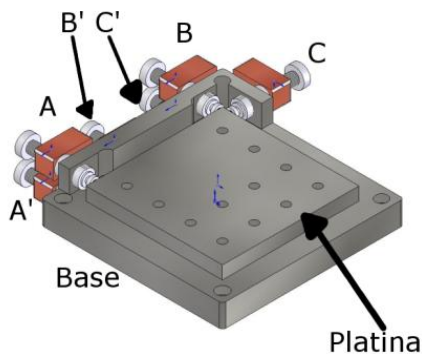


Figura 2.4

El grado de libertad más fácil de controlar es el eje Y, que tiene asociado únicamente un motor, que es el motor “C”. En la Figura 1.6 se muestra el motor y el recorrido del eje Y.

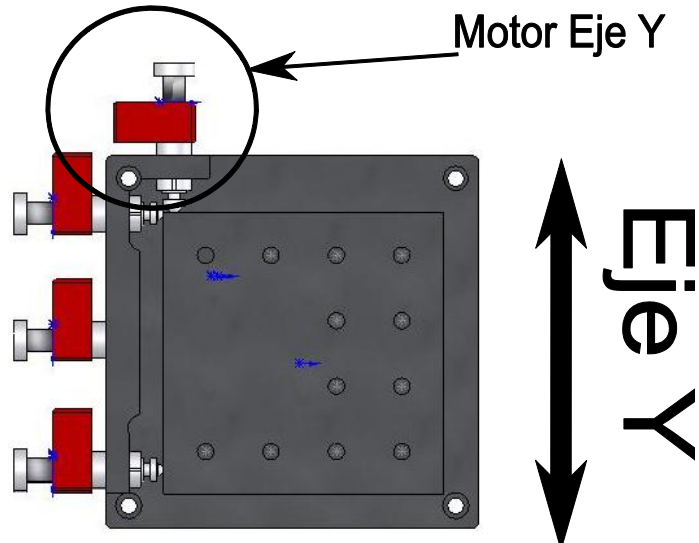


Figura 2.5

Para poder hacer movimientos en el eje X es necesario mover 2 motores, el motor A y el motor B deben moverse una distancia igual, en caso contrario se obtendrá un movimiento en ΘZ , en la Figura 1.7 se puede ver qué motores mueven al eje X y a ΘZ .

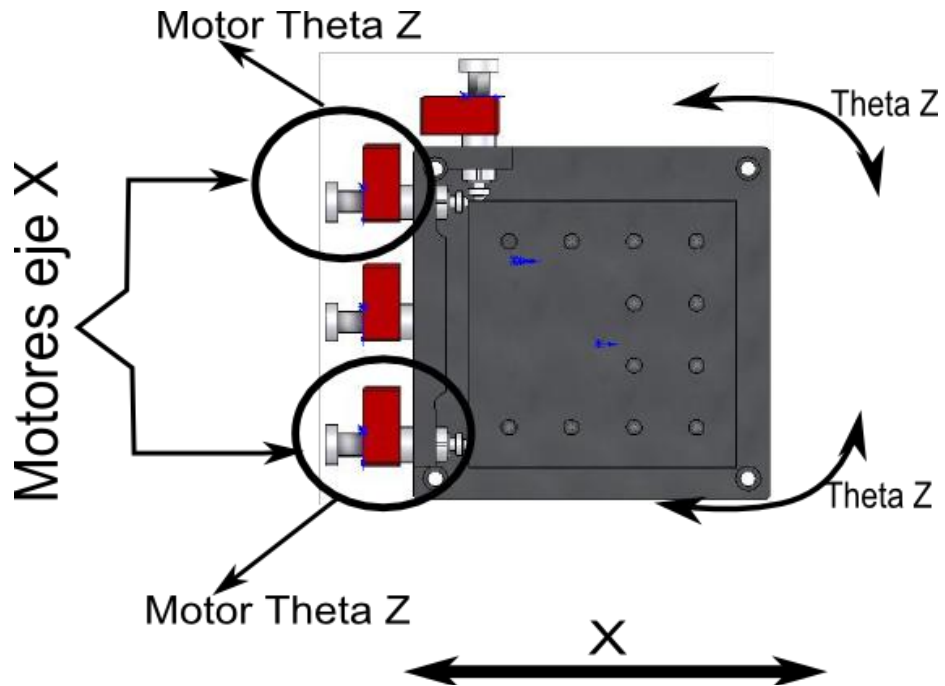


Figura 2.6

El movimiento en el eje Z, en ΘX y en ΘY es controlado por los 3 motores inferiores A', B' y C'. En la Figura 1.8 se muestra cuales son los motores utilizados, para generar un movimiento en Z se deben mover una distancia igual los tres motores, de lo contrario solo se moverá en ΘX o en ΘY .

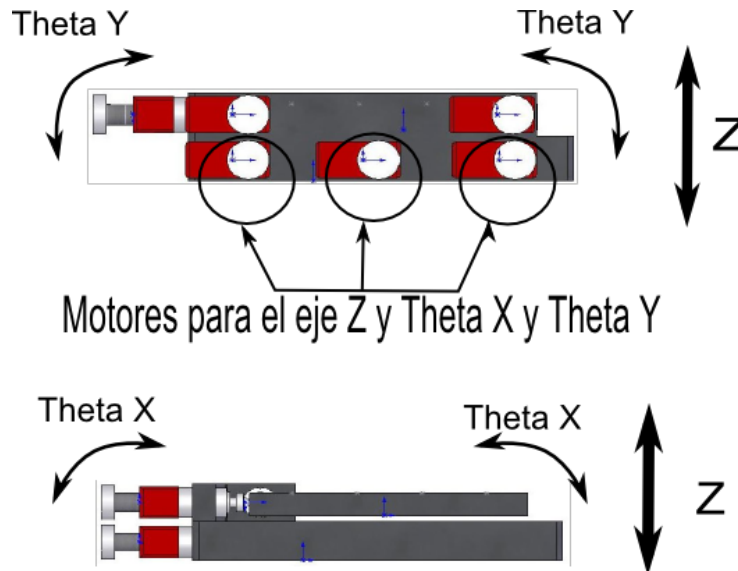


Figura 2. 7

En la Tabla 3 se muestra el resumen de cómo deben moverse los motores para cada grado de libertad. La letra d indica un número de pasos, siendo positivos para avanzar y negativos para retroceder, dado que no existen medios pasos, todo paso que sea fraccionario se tiene que redondear.

Eje o Grado de Libertad	Picomotores activados
x	A=d, B=d
y	C=d
z	A'=d, B'= d, C'=d
Θx	A'=d, B'=d/2 ó C'=d, B'=d/2
Θy	A'=d, C'=d; B'=d
Θz	A=d ó C=d

Tabla 3

Para desarrollar un programa que pueda manejar los ejes X, Y y Z, es necesario realizar un análisis de la situación inicial y dar un diagnóstico de qué cosas se pueden mejorar y cuáles otras es necesario conservar; la primera parte del análisis es sobre el software; mientras que la segunda sobre el hardware. Para este proyecto solo implementaremos la primera fase, la segunda fase quedará pendiente para trabajos futuros.

2.4 Análisis del Software proporcionado de la compañía.

La empresa New Focus pone a disposición de los clientes varios programas, como se mencionó anteriormente, uno de los cuales es para diagnóstico, varios para otro tipo de dispositivos y algunos más para ejemplificar cómo se pueden utilizar los lenguajes de programación para ejemplificar el uso de las librerías o bibliotecas disponibles para la creación de programas mucho más avanzados y específicos.

2.5 Programa de diagnóstico.

El programa de diagnóstico, como su nombre lo indica, es un programa creado para conocer y familiarizarse con los distintos dispositivos de la empresa New Focus, en este caso los controladores 8753 y la estación cinemática o platina de nanodesplazamiento 8095.

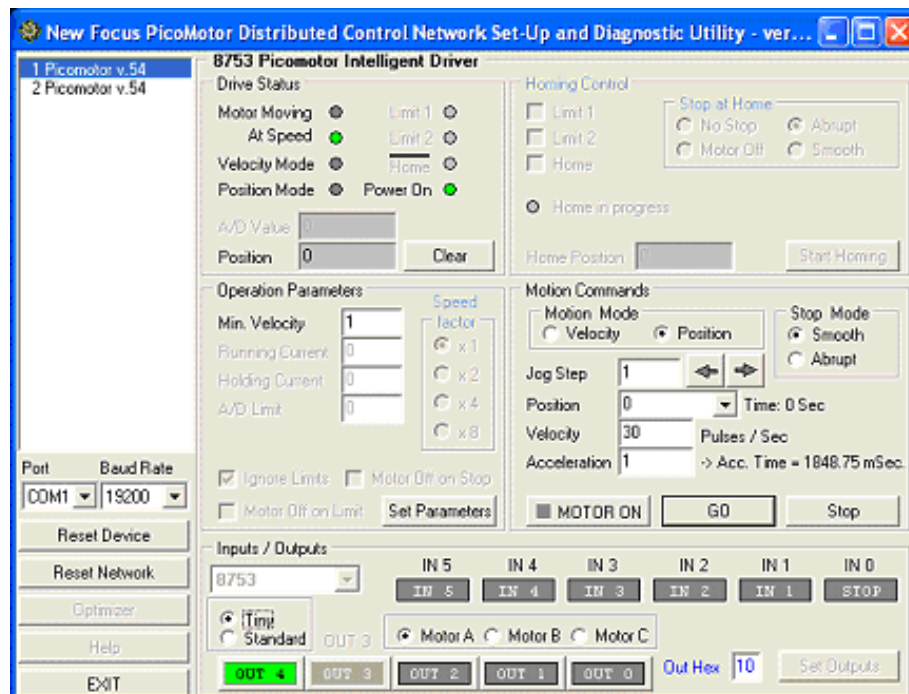


Figura 2. 8

Partes del software.

Este software se puede dividir en 7 secciones que son:

1. Dispositivos conectados: En esta parte del software se informa de cuántos y qué dispositivos ha reconocido el programa y se pueden controlar con el programa.

2. Estado de los controladores: Informa del estado de los controladores, si están encendidos y la configuración.
3. Control para retorno a Origen (HOME): Regresa a una posición designada como el origen (llamada regularmente HOME), en el caso del controlador 8753 está deshabilitada esta sección.
4. Parámetros de operación: Aquí se configuran los parámetros para operar los controladores, son necesarios para que se pongan en funcionamiento los controladores y en consecuencia los dispositivos motorizados de la empresa New Focus.
5. Comandos de movimiento: Le indica a los controladores como se realizarán los movimientos, ya sea por velocidad (que para hasta que se le mande la orden de paro) o por posición, que se detiene hasta alcanzar un número de pasos dados al programa; aquí también se configura la velocidad final a la que operarán los controladores así como su aceleración.
6. Configuración de la comunicación: Determina la forma de comunicación con los controladores y la velocidad con que se dan.
7. Entradas/Salidas: Qué entradas y salidas de los controladores están activadas.

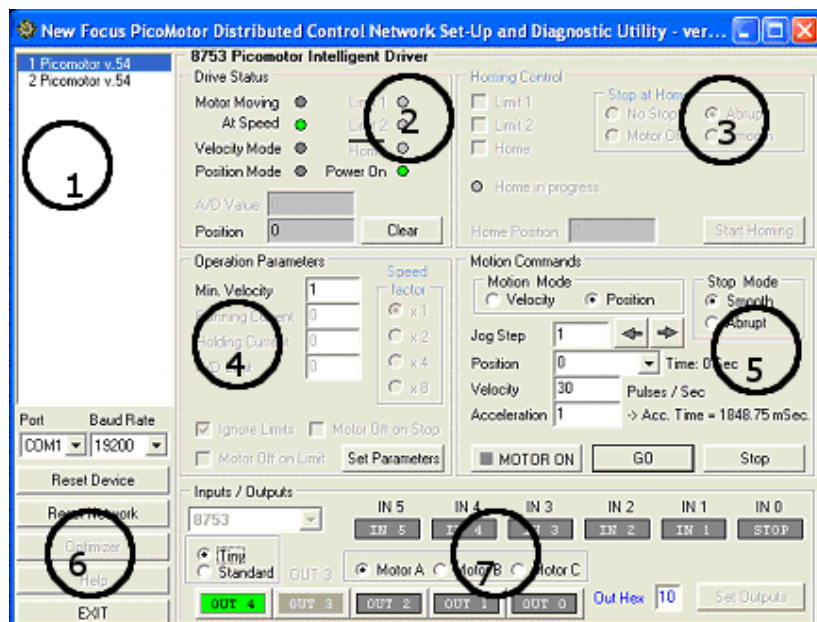


Figura 2. 9

El software proporcionado por la compañía resulta en cierta medida inutilizable para una persona que requiere utilizar la estación sin necesidad de configurar dicho software cada vez que se necesite.

En vez de configurar una y otra vez este software, se puede utilizar de distinta manera el equipo a fin de que las configuraciones sean automáticas. Esto se realizaría de dos formas secuenciadas.

1. Crear un software de simulación: Este primer paso consiste en crear un software independiente al hardware que permita simular algunas características de los sistemas CNC básicas, específicamente el movimiento y marcado. Este software es el que se comunicara con un potencial usuario
2. Software y Hardware de control: Se debe crear un software que controle la estación, movimiento de dos ejes, que es lo que se puede implementar en este momento, así como un sistema que realice el marcado del elemento que podemos poner en la estación.

Ventajas de esta implementación:

Un sistema integrado de control, es decir la integración del control dentro del software que interactúa con el usuario junto al control del hardware del aparato que haría la función de CNC. Tiene la desventaja de ser específico para un sistema. Crear dos software nos crea la ventaja de poder realizar las mismas funciones en aparatos diferentes, desde un sistema CNC construido, o un sistema ex profeso para este trabajo.

Capítulo 3 Creación de Software simulador para el control en un sistema de nanomaquinado.

El motivo de crear un software simulador, en vez de un software integrado, es la modularización del software, para poder desarrollar dicho software por partes e integrarlo a distintos dispositivos de maquinado. Otra razón es que un simulador permite conocer el comportamiento teórico de un dispositivo, permite observar problemas de diversa índole, sin necesidad de que un dispositivo físico este trabajando. La intención es crear un *front-end* amable al usuario, encargando la parte de menor nivel a otros componentes especialmente diseñados.

Para lograr la modularización, el software se dividió en tres partes, encargadas en su conjunto del proceso de simulación de maquinado:

1. Interfaz de usuario (GUI): Será la parte encargada de recibir información del usuario y de enviar los datos al simulador. Indicará la posición actual del simulador, validará los datos administrados por el usuario, enviará los datos de los puntos que se simulará maquinar.
2. Cálculo de figuras geométricas: Dados los datos válidos del usuario determinará qué puntos se van a maquinar. Las funciones que tendrá esta parte del programa serán las de crear puntos consecutivos que formen una línea a partir de los extremos de la misma; o un círculo, dado el centro y radio de dicho círculo.
3. Simulador: Representará gráficamente los resultados de la simulación, marcando los puntos de los cuales se pretende representar que han sido maquinados.

De las tres partes a realizar por el software, la segunda y tercera parte tienen requerimientos especiales para integrarse, estos requerimientos se verán a continuación.

3.1 Requerimientos del cálculo de figuras geométricas.

Cuando se requiere maquinar una figura en un dispositivo bidimensional, esta figura es hecha de manera discreta, ya que los dispositivos se mueven de manera discreta aunque el movimiento parezca continuo. Para determinar estos puntos que conforman la figura discreta se puede recurrir a las técnicas básicas utilizadas en la graficación por computadoras, las cuales permiten discretizar una figura.

Las figuras básicas utilizadas en el simulador son la línea y el círculo, los algoritmos que se utilizarán en el software son los algoritmos de Bresenham para la línea y el círculo. Los algoritmos de Bresenham fueron originalmente diseñados para ahorrar cálculo en los computadores cuando se hacía graficación por

computadoras, estos algoritmos tienen tanto la ventaja de ahorrar cálculo como la posibilidad de discretizar la línea y el círculo dados unos cuantos datos, como lo son los puntos inicial y final de una línea; en el caso del círculo tan solo necesitamos su centro y su radio para determinar los puntos a dibujar, en caso de un dispositivo gráfico, o a maquinar en el caso que nos interesa.

El algoritmo de Bresenham para la línea es el siguiente:

```
Inicio(Punto1(x1, y1), Punto2(x2, y2))
    issteep = Valor_absoluto(y2-y1) > Valor_absoluto(x2-x1)
    Si issteep haz:
        Intercambia x por y en Punto1 y Punto2.
    reversa = Falso
    if x1 > x2:
        Intercambia Punto1 y punto 2.
        reversa = Verdadero
    deltax = x2 - x1
    deltay = Valor_absoluto(y2-y1)
    error = Conveter_Entero(deltax / 2)
    y = y1
    ystep = Nada
    if y1 < y2:
        ystep = 1
    else:
        ystep = -1
    Desde x1 hasta x2 + 1 haz:
        Si issteep haz:
            Dibuja(y, x)
        De lo contrario:
            Dibuja(x, y)
        error -= deltay
        if error < 0:
            y += ystep
            error += deltax
    Devuelve Nada
```

El algoritmo de Bresenham para círculo es:

```
Inicio(radius(radios), Centro(cc(100,100))):
    Cambio = 3 - (2 * radius)
    x = 0
    y = radius
    Mientras x <= y haz:
        Dibuja((x+cc[0], -y+cc[1]))
```



```
Dibuja ( (y+cc[0], -x+cc[1]) )
Dibuja ( (y+cc[0], x+cc[1]) )
Dibuja ( (x+cc[0], y+cc[1]) )
Dibuja ( (-x+cc[0], y+cc[1]) )
Dibuja ( (-y+cc[0], x+cc[1]) )
Dibuja ( (-y+cc[0], -x+cc[1]) )
Dibuja ( (-x+cc[0], -y+cc[1]) )
if Cambio < 0:
    Cambio = Cambio + (4 * x) + 6
else:
    Cambio = Cambio + (4 * (x - y)) + 10
    y = y - 1
    x = x + 1
```

3.2 Requerimientos del simulador de maquinado.

A fin de representar el proceso de maquinado se establecieron ciertos requerimientos en la tercera parte del simulador, el simulador de los resultados o la parte gráfica del simulador, estos requerimientos son:

1. Se representarán dos ejes X, Y; el eje X será el horizontal y el eje Y el vertical.
2. El proceso de maquinado se representara con una marca gráfica.
3. La coordenada con menor valor (0,0) siempre se encontrará en la esquina superior izquierda, y el de mayor valor estará en la esquina inferior derecha dado cualquier tamaño de los ejes X, Y.
4. El tamaño de la simulación será de 640 pixeles para el eje X y de 480 pixeles para el eje Y.

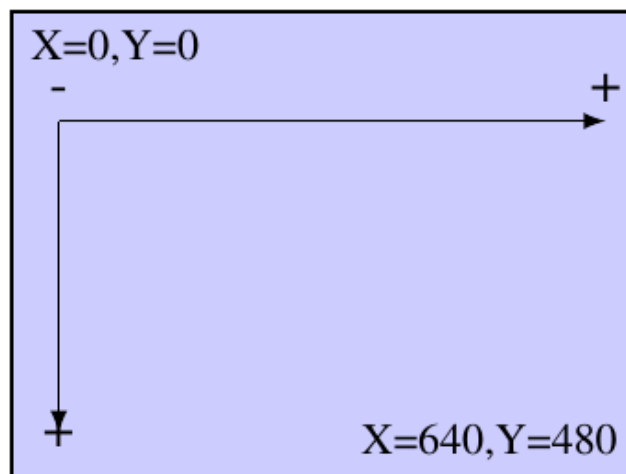


Figura 3. 1

5. La simulación también debe representar el movimiento que haría un dispositivo de maquinado, en este caso se moverá primero en el eje X y después en el eje Y.
6. A la simulación de movimiento se le añadirá un tiempo de espera a fin de representar el retraso creado por el movimiento de traslado.

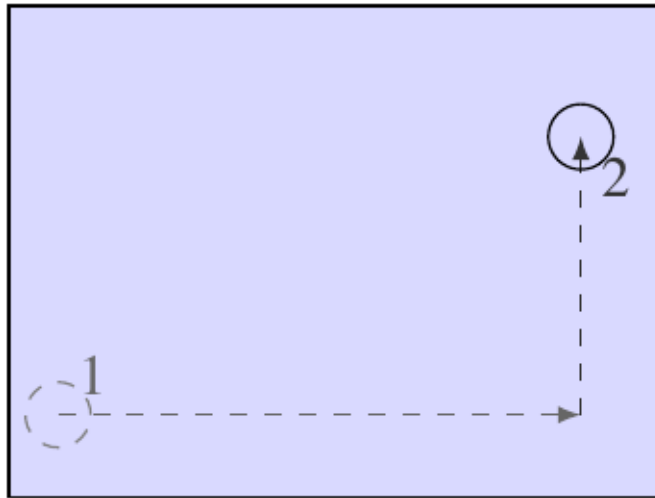


Figura 3. 2

3.3 Programación.

Una vez establecido cuales son los requerimientos necesarios del software, se procedió a realizar el software y los requisitos necesarios para el mismo, uno de los elementos necesarios antes de programar un software es la elección del lenguaje que se utilizará para programar, el lenguaje elegido fue *Python*.

Python es un lenguaje de alto nivel multiplataforma que tiene las siguientes características:

1. Es interpretado.
2. Es orientado a objetos.
3. Es posible integrarlo con otros lenguajes, en especial con C/C++.

Aunque es posible clasificarlo como un lenguaje script, por ser interpretado, el lenguaje *Python* ha sido diseñado específicamente para ser orientado a objetos. De hecho los programadores de *Python* comentan que "todo en *Python* es un objeto", lo que dice mucho del enfoque que se le da a este lenguaje. El lenguaje nos permite construir objetos, con todas sus capacidades, incluyendo los constructores, destructores, clases hijas, clases combinadas, además de contar con un recolector de basura, que se encarga de liberar la memoria cuando ésta ya no se utilice.

Otra característica importante es su integración con otros lenguajes, el más utilizado y conocido es la integración con C/C++, *Python* está programado en C/C++ lo que permite la integración. Esta integración ayuda a crear procesos más eficientes; aunque como *Python* es un lenguaje interpretado tiene una desventaja pues se pierde velocidad.

Además de esta integración también existen otros lenguajes con los cuales se puede integrar, entre ellos Java y C#, lo que permite crear lenguajes que aprovechen las características de los lenguajes originales, sin la necesidad de tener que programar completamente en dichos lenguajes.

Python funciona mediante espacios o indentaciones. Estas indentaciones nos indican donde inicia y termina una rutina; para los programadores esto hace que *Python* se programe de forma amable y clara, se comenta que *Python* es "pseudocódigo hecho lenguaje", esta claridad permite darle continuidad a un proyecto por distintas personas.

Para representar gráficamente los resultados del simulador, utilizamos una herramienta disponible en el lenguaje *Python*, también multiplataforma, que permite utilizar recursos gráficos para videojuegos llamada *Pygame*.

Pygame permite desplegar de una manera sencilla diversos elementos gráficos, entre los que se encuentran el pixel, las líneas, los círculos entre otros elementos, para el software solo utilizaremos algunos de estos, ya que queremos crear estos elementos para representar el proceso de maquinado. Aprovecharemos su capacidad gráfica para dibujar todos los elementos que marcaremos como parte de la simulación de maquinado.

3.4 Estructura del software simulador.

El software simulador se dividió en tres partes mediante tres archivos fuente:

1. Interfaz de usuario (GUI), archivo *fuentes CNC.py*: Es la interfaz gráfica que permite al usuario controlar al simulador mediante las siguientes acciones:
 - a. Mover el simulador y/o marcar puntos individuales.
 - b. Crear líneas o cuadrados.
 - c. Dibujar círculos.
2. Cálculo de figuras geométricas, archivo fuente *puntos.py*: Rutinas que permiten decidir los puntos que se deben dibujar dados los extremos de una línea o el centro y el radio de un círculo mediante los algoritmos de Bresenham.
 - a. Estructura de los datos: Los datos se entregarán a la parte del software que lo solicite mediante una lista de tuplas. Las tuplas son estructuras de datos especiales en *Python*, son similares a una lista

pero sus datos no pueden ser modificados, cada tupla tendrá dos datos imitando la información de una coordenada bidimensional con la posición del eje X e Y.

$$(x, y) \quad [(x, y), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)]$$

Figura 3.3 Tupa y lista

3. Simulador, archivo fuente *muestra.py*: Parte gráfica del simulador, muestra la posición actual del simulador y muestra el resultado de la operación de marcado.
 - a. Indicador de posición: Se indicará la posición con la siguiente herramienta gráfica:



Figura 3.4 Indicador de posición

- b. Marcado de puntos: Para simular los puntos que se han maquinado lo indicaremos cambiando de color dicho punto a rojo:



Figura 3.5 Puntos marcados

3.5 Funciones del software simulador.

El software simulador busca mostrar el comportamiento teórico de los dispositivos de maquinado, CNC, sus funciones principales son las de mover y de marcado; las demás funciones de simulación de maquinado son derivadas de éstas. La línea y el círculo se marcan siguiendo la lista de datos obtenida mediante los algoritmos de Bresenham. La siguiente figura muestra el diagrama de funciones del programa:

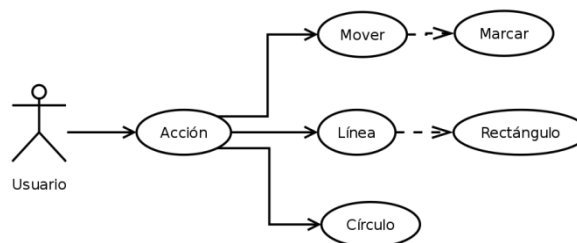


Figura 3.6 Funciones del software

Estas funciones estarán a cargo de la GUI del programa. En la GUI el usuario podrá decidir si quiere mover de posición el simulador, marcar un punto, o dibujar alguna figura. Las figuras disponibles serán tres primitivas gráficas, el punto, representada por la función de marcado; la línea; y el círculo. Los dibujos de la línea y el círculo son una iteración de la función de marcado. Cada primitiva gráfica se puede llamar por separado en la GUI.

Función de marcado: La función de marcado marca un punto en el dispositivo gráfico del simulador, a fin de recrear el proceso cuando maquinamos solo un punto en un dispositivo de maquinado. La función mueve primero el indicador del simulador y posteriormente marca el punto, el marcado ocurre únicamente si se ha dado la orden expresa de hacerlo; a continuación se muestra el diagrama de la función de marcado. Antes de realizar el procedimiento se verifica que esté dentro de los límites de la simulación.

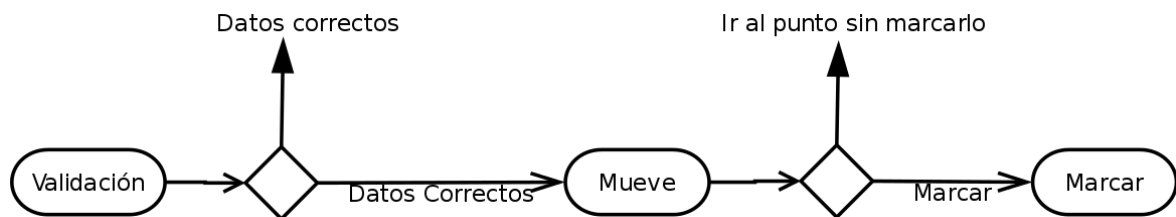


Figura 3.7 Diagrama de marcado

Funciones de línea y cuadro: Esta función simula el proceso de maquinado de una línea o rectángulo, dados dos puntos. El rectángulo básicamente manda a llamar a la línea calculando las líneas que lo componen y llamando a la función línea recursivamente hasta completar el rectángulo. La función línea es una iteración de marcado de puntos obtenidos con el algoritmo de Bresenham dados los extremos de la línea que queremos maquinar. Antes de realizar estos procedimientos se verifica que los puntos con los que haremos las figuras estén dentro de los límites de la simulación.

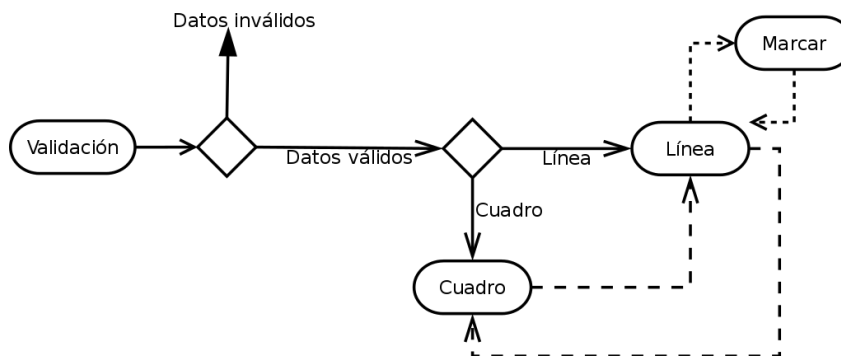


Figura 3.8 Funciones de línea y rectángulo

Función de maquinado de un círculo: Esta función es una iteración de la función de marcado, con lados obtenidos gracias al algoritmo de Bresenham sobre el círculo, que son calculados a partir del centro del círculo y del radio del mismo. Los datos proporcionados por el usuario deben ser válidos antes de llamar a la función círculo.

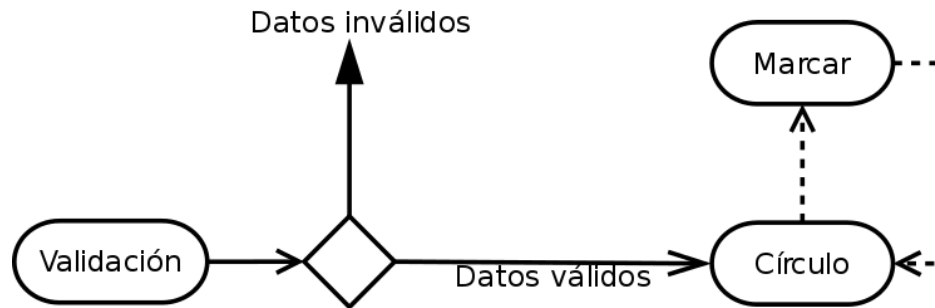


Figura 3.9 Función círculo

3.6 Software simulador.

El software simulador es el resultado de programar en *Python* los puntos anteriores. Siguiendo la división existen tres partes modulares del programa:

1. La interfaz de usuario: que manda a llamar a las otras dos partes.
2. Cálculo de figuras geométricas: La parte del software que permite saber qué puntos marcar en el simulador gráfico.
3. El simulador gráfico: es la parte donde se muestra los resultados de del cálculo de las figuras geométricas.

La siguiente figura muestra como es la relación del software simulador y su modularización.

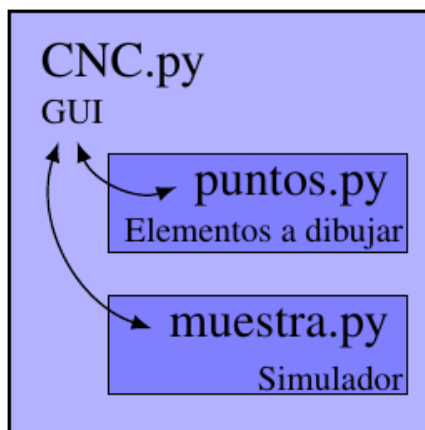


Figura 3.10 Software simulador

3.7 Interfaz gráfica de usuario.

Es la parte que permite interactuar al usuario con el simulador, en esta parte del programa se utilizó una librería de *Python* llamada *Tkinter*, esta librería permite a *Python* crear interfaces gráficas y generalmente se instala al mismo tiempo que *Python*. La interfaz gráfica se dividió en tres partes, la primera informa de la posición actual del simulador así como permite mover y marcar un solo punto. La segunda parte permite marcar una línea y un cuadrado. La última parte simula el maquinado de un círculo. Estas funciones siguen los esquemas mostrados anteriormente en este capítulo.

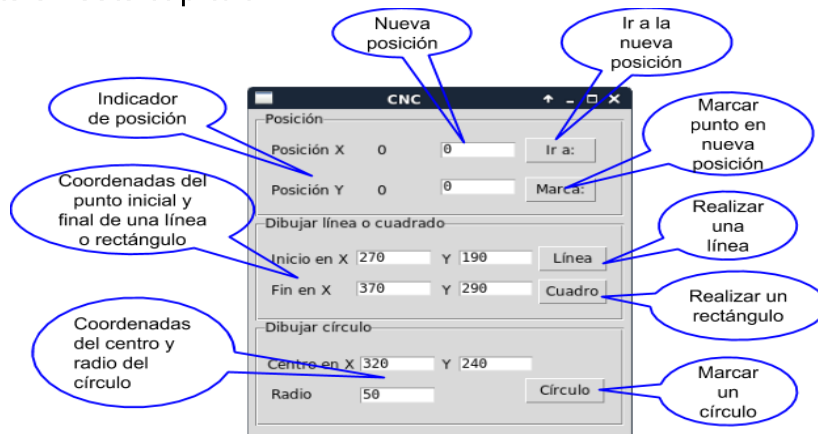


Figura 3. 11 Interfaz gráfica

Para programar esta interfaz y sus funciones se siguió un enfoque orientado a objetos construyendo una clase principal CNC mediante Tkinter cada botón manda llamar a una función en específico.

En la siguiente imagen se muestra los métodos de la clase CNC:

```
CNC  
  
+Ir()  
+marcar()  
+linea()  
+cuadro()  
+circulo()  
+actualizar()
```

Figura 3. 12

- *ir*: Determina si un punto está dentro de las coordenadas de la simulación, si es así mueve la simulación hasta dicho punto.
- *marcar*: Marca un punto dado, siempre que dicho punto pertenezca al rango de la simulación.
- *línea*: Dibuja una línea cuando los puntos inicial y final están en el área de la simulación.
- *cuadro*: Dibuja un cuadro dibujado mediante cuatro líneas, determinado solo por dos puntos. Los puntos deben estar dentro del área de simulación para poder dibujarse.
- *círculo*: Simula o dibuja un círculo dentro del área de simulación, las coordenadas del centro y la circunferencia del círculo deben estar dentro del área permitida.
- *actualizar*: Despliega en la GUI la información de dónde se encuentra actualmente la simulación.

3.8 Simulador gráfico.

El simulador gráfico es la parte que muestra el proceso que tendría el maquinado una vez implementado utilizando la librería especializada en gráficos de videojuegos *Pygame*. La siguiente figura muestra el estado inicial del simulador gráfico.

El simulador también fue programado siguiendo el esquema de programación orientada a objetos, la clase principal del simulador es *muestra*.

La clase tiene las siguientes características:



Figura 3. 13

- *mueve*: Mueve el marcador para simular el movimiento, en este caso un círculo de color rojo.
- *marcar*: Marca un pixel, simulando el mismo efecto en un hardware.
- *dibujar*: Muestra cada punto que ha sido marcado.

3.9 Cálculo de figuras geométricas.

El cálculo de las figuras geométricas es una librería externa que manda llamar la GUI para obtener los puntos que el simulador va a marcar. La librería está compuesta por las siguientes funciones basadas en los algoritmos de Bresenham:

- `get_line`: Obtiene los puntos que pertenecen a una línea.
- `circle`: Determina qué puntos pertenecen a un círculo.

Capítulo 4 Trabajos futuros

El software de simulación solo es una parte del sistema completo de maquinado, el hardware es la parte que falta para completar el sistema y está planteada como un trabajo futuro a realizar.

Como posibles soluciones para la parte del hardware se plantearán dos modelos diferentes, se utilizaría la Estación Cinemática o Platina de Nanodesplazamiento. El segundo modelo sería utilizando motores de pasos, siendo controlados por una tarjeta microcontroladora.

Además de la implementación en hardware, también existe la posibilidad de ampliar las funciones del software simulador, en especial de crear un software capaz de realizar más gráficas primitivas.

Dado que el software se construyó de manera modular, cada solución se puede hacer de manera independiente a las otras partes del software, al menos en teoría, lo que permitiría elegir qué parte desarrollamos primero.

Los siguientes temas exponen el trabajo a futuro que es posible desarrollar para el software simulador.

4.1 Implementación en hardware del software simulador.

Para crear un sistema completo de maquinado, se debe contar con un dispositivo que realice el maquinado. A fin de que nuestro software realice un maquinado en un dispositivo externo este debe ser capaz de controlar tanto al hardware como al simulador gráfico. La parte que se modificaría del software para que pueda controlar tanto a la parte gráfica como al hardware es la parte del simulador gráfico, este nuevo simulador, o más bien representador gráfico tendrá las siguientes funciones:

1. Deberá mover el hardware en dos ejes X, Y, así mismo deberá representar dichos ejes de manera gráfica. Los ejes X e Y serán elegidos de acuerdo a cómo sea la configuración del hardware.
2. El proceso de maquinado que se realice en el hardware se representará con una marca gráfica.
3. La coordenada con menor valor (0,0) será determinada de igual manera por la configuración que elijamos del hardware.
4. El tamaño de la representación gráfica se elegirá por cuánta resolución tiene nuestro dispositivo de hardware.

5. La simulación también debe representar el movimiento que haría el hardware de maquinado, el orden del movimiento de los ejes deberá ser acorde con el movimiento presentado por el hardware.
6. La marca gráfica que representa que un punto ha sido maquinado se representará solamente cuando dicha operación se haya realizado.
7. El software también debe manejar los errores y excepciones que genere el hardware al realizar cualquier operación.

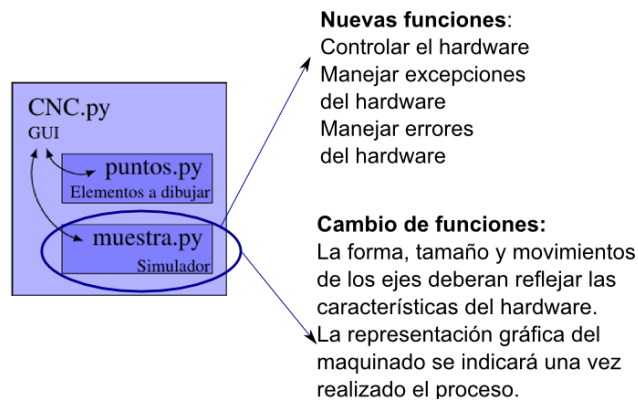


Figura 4. 1

4.2 Integración del software con la estación cinemática.

La estación cinemática 8095 se puede controlar por la computadora mediante un sistema que consiste en un controlador físico, controladores 8753 y un controlador lógico o computacional, una librería para lenguajes de programación que actúa como librería como driver, *Ldcnlib.dll*, diseñada para interactuar con programas hechos con lenguaje C/C++ para sistemas operativos de escritorio de Microsoft. El siguiente diagrama muestra las partes del sistema de control de la estación cinemática.

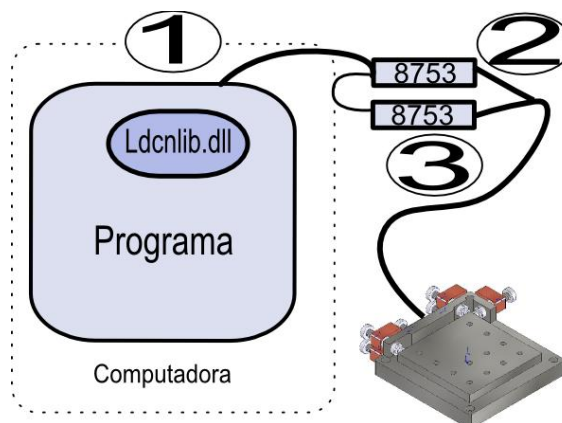


Figura 4. 2

Aunque el software simulador está escrito y desarrollado en *Python*, existe la posibilidad de integrar el simulador a un programa en C/C++ o integrar un programa escrito en C/C++ al software en *Python*. Estas posibilidades permiten tener nuestra interfaz gráfica escrita en *Python* mientras que el simulador gráfico controla una librería especialmente diseñada para controlar la estación hecha en C/C++. Además de la integración *Python* permite ejecutar subprocesos, los subprocesos en *Python* son programas que son controlados en *Python* mediante una librería especial, de esta manera podemos crear un programa que controla la estación y controlar dicho programa mediante un subproceso en *Python* mediante el software creado.

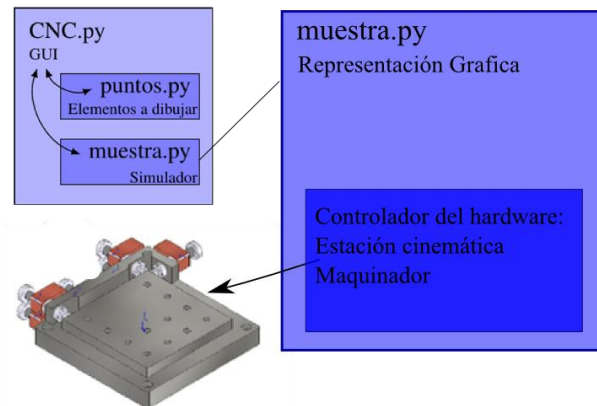


Figura 4.3

4.3 Configuración de la estación cinemática.

De la misma forma que se necesita realizar algunos ajustes al software que funcionará como controlador de la estación cinemática, también necesitamos configurar la estación cinemática para que esta pueda realizar maquinados. La estación cinemática puede trabajar hasta con seis grados de libertad y en tres ejes; para facilitar el desarrollo se propone que solo se manejen dos ejes, el eje X y el eje Y dispuestos de esta forma:

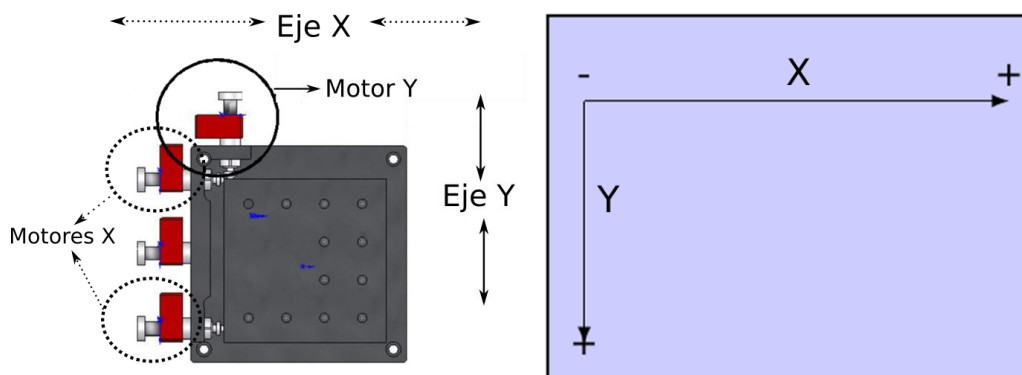


Figura 4.4

La interacción entre la computadora y la estación se da mediante dos controladores que tienen tres salidas que controlan. Las salidas se han designado de la 1 a la 6, los motores del eje x se conectarían a las salidas 1 y 4, y el eje Y a la salida 3.

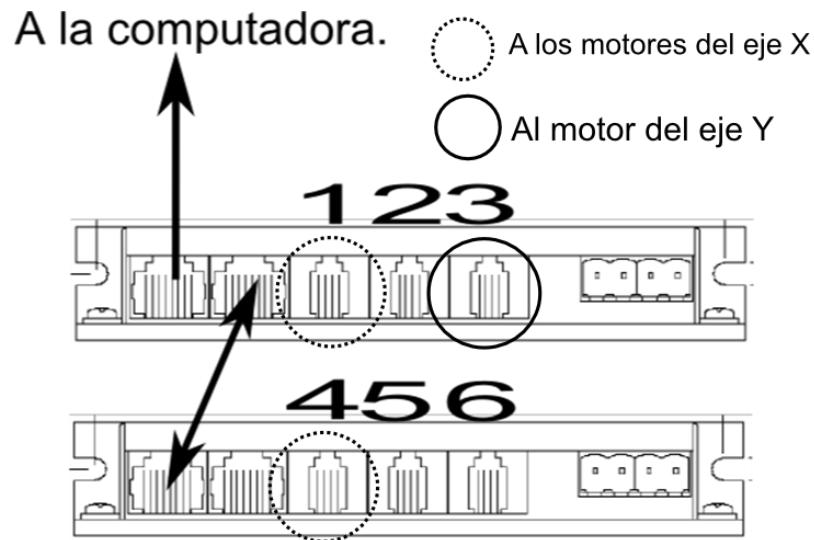


Figura 4. 5

Dado que se necesita mover dos motores para tener movimiento en el eje X, la librería o el software que interactúa con los controladores de la estación cinemática debe sincronizar ambos controladores para lograr el movimiento en el eje X.

4.4 Sistema de maquinado.

Para realizar la función de maquinado necesitamos un sistema que sea capaz de crear marcas o perforar un material a fin de crear piezas en dicho material. Existen diversos sistemas que pueden marcar un material, sin embargo debido a la demanda de precisión que tiene la estación se necesita un sistema especial que permita perforar un material y al mismo tiempo que este corte sea lo más pequeño posible.

Una alternativa de corte son los sistemas de laser, un laser es un haz de luz coherente, es decir que la luz que emite el laser viaja de manera sincronizada, por lo que podemos realizar cortes de acuerdo con el tamaño de la longitud de onda de acuerdo al color del laser.

El laser puede ser ajustado para hacer micromaquinado y nanomaquinado dependiendo de la forma en que esté configurado. La siguiente imagen muestra como sería la disposición del laser.

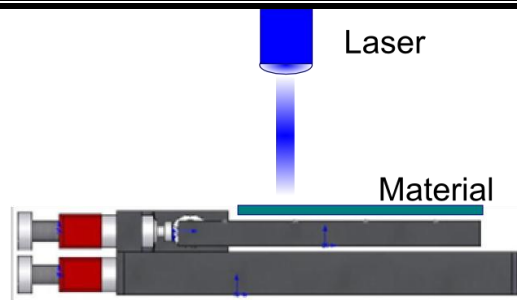


Figura 4. 6

Para evitar que el material sufra demasiado daño, con lo que la precisión bajaría, se emiten pulsos del láser solo por unas cuantas fracciones de segundo, entre más pequeña sea la fracción mejora la precisión, en el caso del micromaquinado y nanomaquinado, se emiten pulsos de alrededor de un nanosegundo, 1×10^{-9} , y un femtosegundo, 1×10^{-15} [49].

De esta manera el trabajo a seguir es obtener un sistema que pueda realizar cortes en escala micrométrica y nanométrica.

Conclusiones.

Se programó un software simulador que permite reproducir el comportamiento de un dispositivo de maquinado de puntos, líneas y círculos. El movimiento del indicador de posición y el marcado se programaron para mostrar cómo se movería un dispositivo que mueva un eje a la vez, para el simulador se escogió mover siempre primero el eje X. El software simulador está diseñado modularmente con el fin de independizar sus partes componentes. Los resultados de la programación se muestran a continuación.

Software final

La GUI y el simulador gráfico se separaron en dos ventanas diferentes, la GUI se encarga de recibir los datos del usuario, validar dichos datos, así como mover y marcar los datos en la parte gráfica del simulador. La librería *puntos.py* calcula los puntos a marcar en una línea así como del círculo, a partir de la información obtenida y validada por la GUI. En la siguiente imagen se muestra el software:

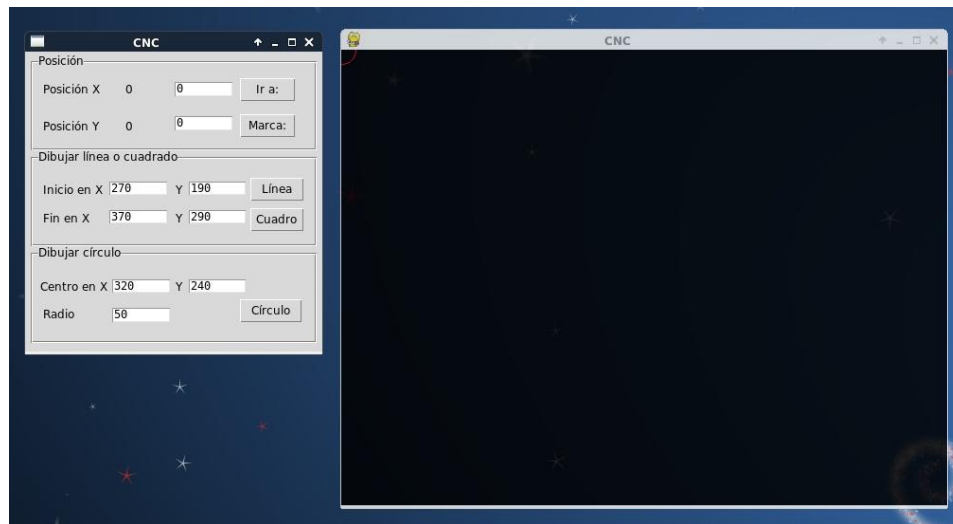


Figura C. 1 Software de simulación

Resultados del software

Con el software proporcionado se pueden realizar distintas figuras geométricas basadas únicamente en la línea y el círculo. Para mostrar lo que es capaz de realizar al iniciar el software las funciones de línea, cuadrado y círculo tienen están configuradas para simular un maquinado.

En la siguiente imagen se muestra el resultado de esta configuración predefinida, la cual consiste en un círculo inscrito en un cuadro así como una diagonal de dicho cuadro.

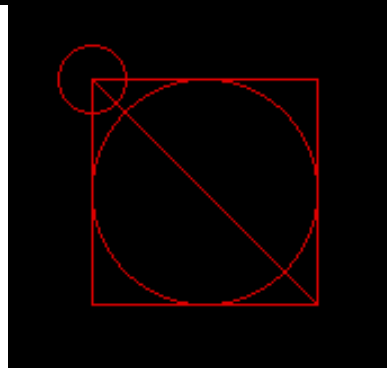


Figura C. 2 Ejemplos.

La siguiente figura es un ejemplo de las posibilidades de creación de figuras utilizando solo círculos y líneas, se pueden crear algunas figuras geométricas circunscritas como el hexágono.

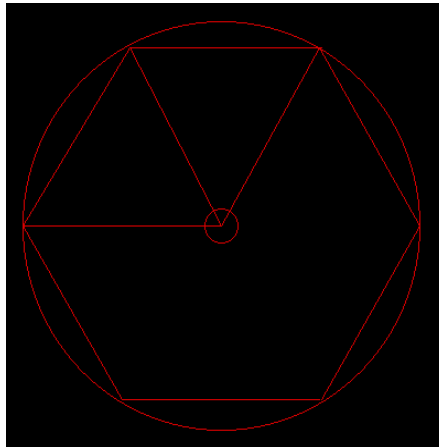


Figura C. 3 Hexágono y círculo

Las siguientes imágenes muestran el proceso que hace el simulador para realizar un círculo, una diagonal y un cuadrado, se muestran algunos de los pasos intermedios de este proceso.

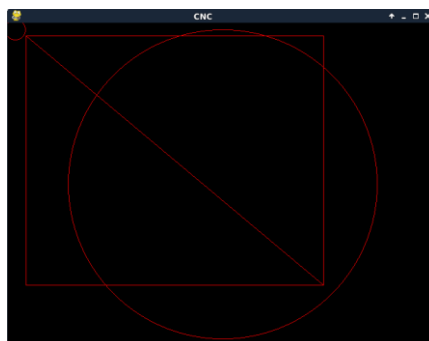


Figura C. 4 Simulación.

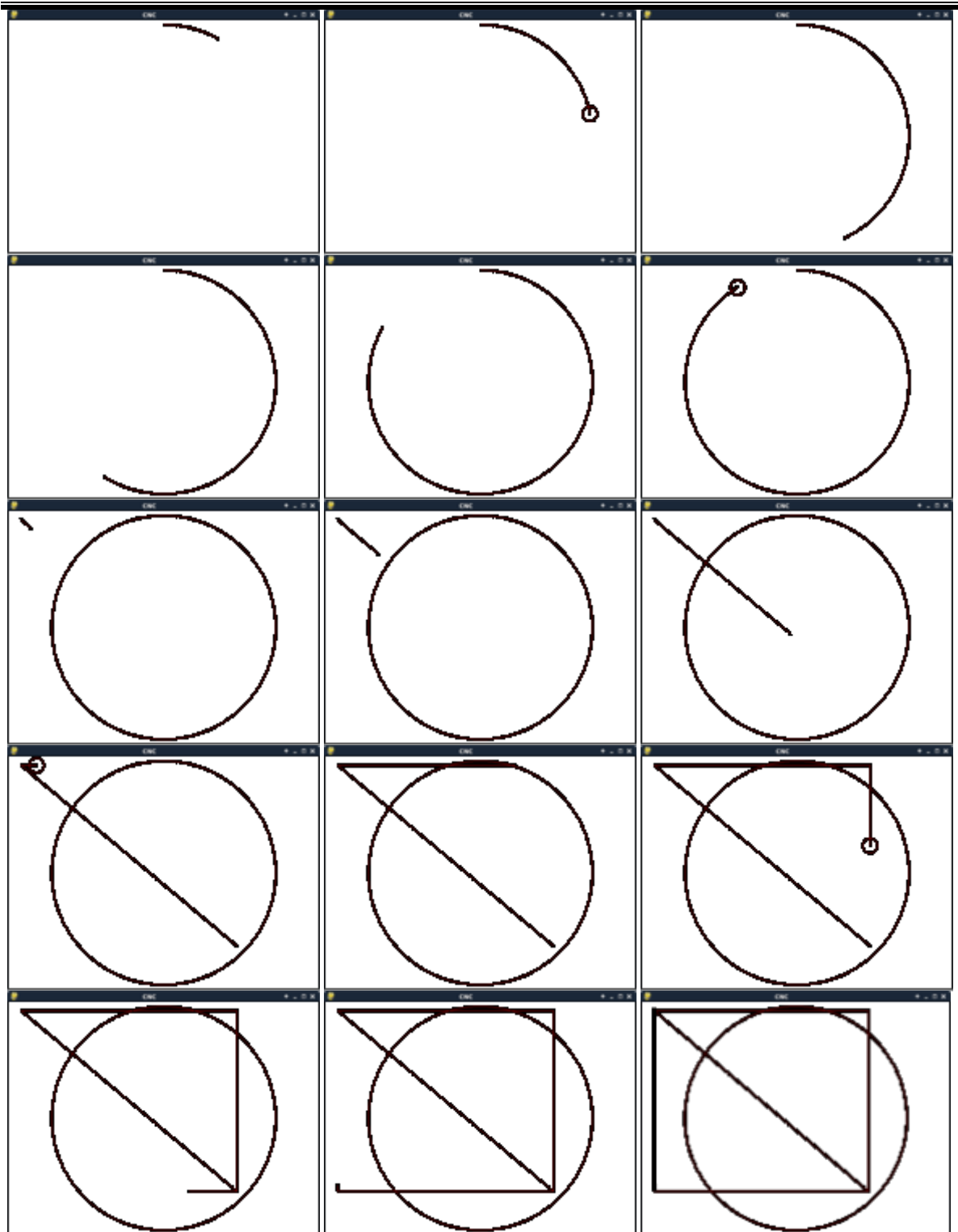


Figura C.5 Proceso de simulación

Bibliografía

- [1] COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. Hacia una estrategia europea para las nanotecnologías. Informe técnico, European Commission (mayo 2004).
- [2] NATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL. National nanotechnology initiative; research and development supporting the next industrial revolution, supplement to president's fy 2004 budget. Informe técnico, National Nanotechnology Initiative (octubre 2003).
- [3] NATIONALS CIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL. National nanotechnology initiative; research and develop leading to a revolution in tecnologia and industry, supplement to president's fy 2006 budget. Informe técnico, National Nanotechnology Initiative (marzo 2005).
- [4] NATIONALS CIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL. National nanotechnology initiative; research and develop leading to a revolution in tecnologia and industry, supplement to president's fy 2007 budget. Informe técnico, National Nanotechnology Intitiative (julio 2006).
- [5] RICHARD FEYNMAN. There's plenty of room at the bottom. Engineering & Science (febrero 1960).
- [6] NORIO TANIGUCHI. On the basic concept of “nanotechnology”. Proceedings of the International Conference of Production Engineering (1974).
- [7] G. BINNIG, H. ROHRER, CH. G ERBER Y E. WEIBEL. Tunneling through a controllable vacuum gap. Applied Physics Letters 40(2), 178–180 (1982). AIP.
- [8] G. BINNIG, C. F. QUATE Y CH. GERBER. Atomic force microscope. Physical Review Letter 56(9), 930–933 (marzo 1986). American Physical Society.
- [9] J. HERION, K. SZOT, CH. ROSS Y F. SIEBKE. Towards a better understanding of surfaces of hydrogenated amorphous silicon: Investigation by stm and afm. Journal of Non-Crystalline Solids 227, 78–82 (mayo 1998). Elsevier.
- [10] EDER ZAVALA LÓPEZ Y OXANA VASILIEVNA K HARISSOVA. Síntesis de nanotubos y fullerenos. Ingenierías V (14), 7–13 (2002). Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [11] <http://www.hemerodigital.unam.mx>.
- [12] OXANA VASILIEVNA K HASISSOVA Y U BALDO O RTIZ M ÉNDEZ. La estructura del fullereno c60 y sus aplicaciones. Ciencia UANL V, 475–479 (2002).

[13] <http://www.comoves.unam.mx>.

[14] ERICK DREXLER. “Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology”. Anchor Press/Doubleday (1986).

[15] ERICK DREXLER. “La Nanotecnología: El surgimiento de las máquinas de la creación”. Gedisa (1993).

[16] HIROYUKI FUJITA, editor. “Micromachines as tools for Nanotechnology”. Springer (2003).

[17] GREGORY TIMP, editor. “Nanotechnology”. Springer (1999).

[18] TOYOKO ARAI Y MASAHIKO TOMITORI. Interaction measurements between a tip and a sample in proximity regions controlled by tunneling current in a uhv stm-afm. Applied Surface Science 144, 501–504 (abril 1999). Elsevier.

[19] D.M. EIGLER Y E.K. SCHWEIZER. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. Nature 344, 524–526 (1990).

[20] M.F. CROMMIE , C.P. LUTZ Y D.M. EIGLER. Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. Science 262, 218–220 (1993).

[21] E. OESTERSCHULZE, A. MALAVE, U.F. KEYSER, M. PAESLER Y R.J. HAUG. Diamond cantilever with integrated tip for nanomachining. Diamond and related materials 11, 667–671 (2002). ELSEVIER.

[22] CHERYL R. BLANCHARD. Atomic force microscopy. The Chemical Educator 1(5) (1996).

[23] SUNG-YOUNG LEE, SUNG-MIN KIM, EUN-JUNG YOON, CHANG-WOO OH, ILSUB CHUNG, DOGGUN PARK Y KINAM KIM. A novel multibridgechannel mosfet (mbcfet): fabrication technologies and characteristics. Transactions on Nanotechnology 2(4) (diciembre 2003). IEEE.

[24] YAO ZENG, TIM FOOTZ, DAMMIKA P MANAGE Y CRISTOPHER JAMES BACKHOUSE. Rapid self-assembly of dna on a microfluidic chip. Journal of Nanobiotechnology (febrero 2005). BioMed Central.

[25] KENNETH CASTELINO, SRINATH SATYANARAYANA Y METIN SITTI. Manufacturing of two and threedimensional micro/nanostructures by integrating optical tweezers with chemical assembly. En “Nanotechnology, 2003. IEEE-NANO 2003. 2003 Third IEEE Conference on”, tomo 1, páginas 56–59. IEEE (agosto 2003).

[26] WENCHUANG HU, KOSHALA SARVESWARAN, MARYA LIEBERMAN Y GARY H. BERNSTEIN. High-resolution electronic beam lithography and dna nanopatterning for molecular qca. Transactions on Nanotechnology 4(3) (mayo 2005). IEEE.

[27] MARK BOHR. 65 nm technology for high performance and low power. En “Intel Developer Forum”. Intel (2005).

[28] J. A. Mol, J. Verduijn, R. D. Levine, F. Remacle, and S. Rogge. Integrated logic circuits using single-atom transistors. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA Volume: 108 Issue: 34 Pages: 13969-13972 (Agosto 23 2011).

[29] ETC GROUP. Manual de bolsillo tecnologías nanoescalares y la “teoría del little bang”. Publicación electrónica, etc group (junio 2005).

[30] C A HABERZETTL. Nanomedicine: destination or journey? Nanotechnology 13(4), R9–R13 (agosto 2002). Institute of Physics Publishing.

[31] http://www.nano.unam.mx/index.php?option=com_frontpage&Itemid=76.

[32] http://www.nano.unam.mx/index.php?option=com_informacioninvestigadores.

[33] WU LIN, NGOI KOK ANN Y LIM ENK NG. Concepts for a class of novel piezoelectric self-locking long-stroke actuators. Precision Engineering 26, 141–154 (abril 2002). ELSEVIER.

[34] MIGUEL CÚPICH RODRÍGUEZ Y FERNANDO J. ELIZONDO GARZA. Actuadores piezoeléctricos. Ingenierías III (6), 22–28 (2000). Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

[35] MUSA JOUANEH Y RENYI YANG. Modeling of flexure-hinge type lever mechanisms. Precision Engineering (27), 407–418 (2003). ELSEVIER.

[36] T. HIGUCHI, Y. YAMAGATA, K. FURUTANI Y K. KUDOH. Precise positioning mechanism utilizing rapid deformations of piezoelectric elements. Proceedings, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots páginas 222–226 (1990). IEEE.

[37] YANG GUOZHENG, LU QIUHONG, DING GOUQUING Y YANG DETIAN. The prototype of a piezoelectric medical microrobot. Proceedings of 2002 International Symposium on páginas 222– 226 (2002). IEEE.

[38] WON JONG KIM Y SHOBHIT VERMA. Fabrication and control of a 6-dof magnetic levitation stage with nanopositioning capability. Proceeding of the 2004 American Control Conference páginas 2487–2492 (2004). IEEE.

- [39] WON JONG KIM Y HIMANSHU MAHESHWARI. High-precision control of a maglev linear actuator with nanopositioning capability. Proceeding of the 2002 American Control Conference páginas 4279–4284 (2002). IEEE.
- [40] KWANG SUK JUNG Y YOO SU BAEK. Precision stage using a non-contact planar actuator based on magnetic suspension technology. Mechatronics 13, 981–999 (mayo 2002). Pergamon.
- [41] KLAUS GLATZEL, GEORGE KHURDOK Y D IETER ROGG. The development of the magnetically suspended transportation system in the Federal Republic of Germany. TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY VT-29(1), 3–16 (1980). IEEE.
- [42] WON JONG KIM, SHOBHIT VERMA Y HUZEFA SHAKIR. Multi-axis maglev nanopositioner for precision manufacturing and manipulation applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, páginas 1159–1167 (2005). IEEE.
- [43] GENGIS KANHG TOLEDO RAMÍREZ. Diseño, construcción y control de una plataforma de levitación magnética.
- [44] VALENTINAS SNITKA. Ultrasonic actuators for nanometre positioning. Ultrasonics 38, 20–25 (marzo 2000). Elsevier.
- [45] CHENGDE L I Y SUWAS NIKUMB. Ultra-fine surface machining of glass using laser-produced charged particles. Applied Surface Science páginas 264–270 (diciembre 2003). ELSEVIER.
- [46] F.Z. FANG. Nano-turning of single crystal silicon. Journal of Materials Processing Technology 82, 95–101 (1998). ELSEVIER.
- [47] WEI GAO, ROBERT J. HOCKEN, JOHN A. PATTEN, JOHN LOVINGOOD Y DON A. LUCCA. Construction and testing of a nanomachining instrument. Precision Engineering 24, 320–328 (2000). ELSEVIER.
- [48] New Focus Inc. Intelligent Picomotor Control Modules Driver, Controller, and Joystick
- [49] NAEEM MOHAMMED Choice Of Laser Sources for Micromachining ICALCO 2010, 743-752 (2010)

