



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y  
TECNOLOGÍA AVANZADA UNIDAD LEGARIA**

---

**SISTEMA DE MICRO-POSICIONAMIENTO PARA LA  
FABRICACIÓN DE MICROARREGLOS**

---

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

*MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA*

PRESENTA:

**INGENIERO ANTONIO GUSTAVO JUÁREZ GRACIA**

DIRECTOR:

**DR. JOSÉ LUÍS HERRERA PÉREZ**

---

**México D. F. enero del 2007.**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F. el día \_\_\_\_\_ del mes \_\_\_\_\_ del año \_\_\_\_\_, el (la) que suscribe Antonio Gustavo Juárez Gracia alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A050189, adscrito a CICATA-IPN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Luís Herrera Pérez y cede los derechos del trabajo intitulado SISTEMA DE MICRO-POSICIONAMIENTO PARA LA FABRICACION DE MICROARREGLOS, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección cicata81@yahoo.es. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

ANTONIO GUSTAVO JUÁREZ GRACIA

Nombre y firma



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:00 horas del día 11 del mes de diciembre del 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de grado titulada:  
SISTEMA DE MICRO-POSICIONAMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE MICROARREGLOS

Presentada por el alumno:

Juárez  
Apellido paterno

Gracia  
materno

Antonio Gustavo  
nombre(s)

Con registro: 

A	0	5	0	1	8	9
---	---	---	---	---	---	---

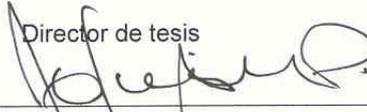
aspirante al grado de:

MAESTRO EN TECNOLOGIA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

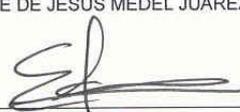
#### LA COMISION REVISORA

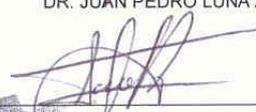
Director de tesis

  
DR. JOSE LUIS HERRERA PEREZ

  
DR. JOSE DE JESUS MEDEL JUAREZ

  
DR. JUAN PEDRO LUNA ARIAS

  
DR. ERNESTO MARIN MOARES

  
DR. JOSE FRANCISCO SANCHEZ RAMIREZ

#### EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA  
APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA  
DEL IPN  
DR. JOSE ANTONIO IRAN DIAZ GONGORA

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco, al Dr. José Luís Herrera Pérez, por su paciencia y sabiduría, por la excelente e inigualable dirección, así como su incondicional dedicación y ayuda en la realización de este trabajo de tesis, además de su devota y leal amistad y ecuanímes consejos.

A Srita. Ana Leticia Cardona Gómez, por su fina y extraordinaria atención, por su apoyo incondicional que me brindó, durante mis estudios, así como también por sus acertados consejos, su cariño y su muy valiosa y preciada amistad.

Al grupo de trabajo que conforman el Programa de Tecnología Avanzada: Ing. Armando, C.P. Horacio, Ing. Pablo, Srita. Laura Vega y Andrés; por sus finísimas atenciones, ayuda, consejos y asesoría, así como también por su generosa amistad.

Un sincero agradecimiento a los profesores del CICATA-IPN: Dr. José Antonio Díaz Góngora, Dr. Miguel Ángel Aguilar Frutis, Dr. Juan Pedro Luna Arias, Dr. José Francisco Sánchez Ramírez, Dr. José de Jesús Medel Juárez, Dr. Ernesto Marín Moares, M. en C. Abel Tinoco Dávila; por aportar sus incuestionables conocimientos, estar a disposición de resolver dudas y aclaraciones, y así como sus oportunos comentarios, observaciones, correcciones y consejos durante el desarrollo de la presente tesis.

A todos mis compañeros del postgrado y particularmente al Ing. Gerardo Vera Medina por su gran y valioso apoyo en el desarrollo y fabricación de las partes mecánicas del robot. Al Ing. Marcos Bravo Robles por su apoyo en aportación de arreglos electrónicos

A todo el personal administrativo y técnico que conforman la comunidad del CICATA-IPN Legaria, de igual manera a todo el personal de intendencia y seguridad que aquí colaboran, por sus amables servicios prestados a un servidor y a este centro de investigaciones.

Agradezco, tanto al CONACYT como al programa PIFI-IPN, por el apoyo económico que por medio de sus becas fue otorgado durante el desarrollo del presente trabajo de tesis.

# DEDICATORIA

---

## **A DIOS:**

*Doy gracias a Dios en principio, por haberme dado la oportunidad de concluir la maestría exitosamente y por iluminarme en la realización de esta tesis.*

## **A MIS PADRES:**

*Doy gracias a mis padres: “Gustavo y Manolita” por haberme dado la mayor herencia que se le puede dar a un hijo que es el estudio. Les doy las gracias por su gran apoyo y dedicación en tantos años de desvelo para hacerme una persona de bien. Les doy las gracias por creer en mi en todo momento y tener la seguridad de que iba a salir adelante. Doy gracias a ustedes por tanto amor que me han dado.*

*Doy gracias a ustedes porque gracias a ustedes voy a vivir con su compañía una de las mas bonitas experiencias que puede haber en la vida, que es mi obtención de grado como Maestro en Tecnología Avanzada.*

***¡¡ Los amo a los dos y que dios los bendiga hoy y siempre!!***

## **A MI HERMANO:**

*Doy gracias a mi hermano José Yahir por apoyarme moralmente con su carisma y alegría de niño que me ayudaba a relajarme en los momentos en que al realizar esta tesis parecían ser muy difíciles.*

*Espero en Dios que un día no muy lejano yo te pueda ver en un día tan especial como hoy. No olvides que te quiero mucho hermano y que siempre te voy a apoyar para que logres objetivos tan bonitos como en el que me encuentro yo hoy.*

## **A MI NOVIA:**

*Gracias Karina por estar presente en mi vida, gracias a tu comprensión y apoyo, hoy he logrado concluir la realización de esta tesis que también es tuya, así como también, lo es mi infinita predilección que tengo hacia tu ser, hacia tu alma, hacia tu vida gracias, te amo, te amo, ....*

# ***CONTENIDO GENERAL***

---

	<b>PÁGINA</b>
<b>Resumen</b>	i
<b>Abstract</b>	ii
<b>CAPITULO 1</b>	
Introducción	1
1.1 Biosensor	2
1.2 Funcionamiento de un biosensor	2
1.3 Características de los biosensores	3
1.4 Clasificación de los biosensores	6
1.4.1 Clasificación de los biosensores ópticos	8
1.4.2 Principio de funcionamiento de un sensor óptico	9
1.4.3 Biosensor por fibra óptica	11
1.4.4 Biosensor por resonancia de plasmones superficiales ó SPR	13
1.4.5 Aplicaciones de los biosensores ópticos	16
1.4.6 Biosensores nanomecánicos ó cantilevers	18
1.4.7 Aplicaciones de los biosensores microcantilevers	22
Resumen del capítulo I	23
Referencias del capítulo I	23-24

## **CAPITULO 2**

### Biosensores de ADN

	25
Introducción	
2.1 ¿Qué es el ADN?	26
2.2 ¿Qué es un biosensor de ADN?	26
2.3 Dimensiones de un biosensor de ADN	29
2.4 ¿Cómo se fabrica un biosensor de ADN?	30
2.5 Procedimiento de fabricación	30
2.6 ¿Cómo se utiliza un biosensor de ADN?	32
2.7 Hibridación del ADN	34
2.8 Aplicaciones de los microarreglos	34
Resumen del capítulo II	40
Referencias del capítulo II	42
<b>CAPITULO 3</b>	43
Introducción a Sistemas Automatas	
3.1 Definición de robot	44
3.2 Tipos de robots	47
3.3 Partes fundamentales de un Robot	50

3.4 Configuraciones morfológicas de un robot	71
3.5 Rendimiento Dinámico	75
3.6 Precisión de movimiento	76
Resumen del capítulo III	77
Referencias del capítulo III	77
<b>CAPITULO 4</b>	
Diseño del Hardware y Software del Robot	78
Introducción	78
4.1 Diseño de Hardware	78
4.2 Descripción de las partes de un Robot	79
4.3 Diseño de Software	90
4.4 Propuesta de puntos que pueden ser controlados por el usuario en el software.	91
4.5 Funcionamiento del Software	92
Resumen	96
Referencias del capítulo IV	96
<b>CAPITULO 5</b>	97
Resultados y Conclusiones	107
Bibliografía	108

---

---

## RESUMEN

La alteración de los patrones de expresión del ADN tiene profundos efectos en las funciones de los organismos biológicos. Tales alteraciones ó variaciones son las responsables de muchas enfermedades que aquejan a nuestra población. La búsqueda de esos cambios requiere de una enorme cantidad de tiempo y recursos. Es por ello que en los últimos años el gran progreso en la Biología Molecular ha conducido a la necesidad de desarrollar técnicas para determinar secuenciación y detección de mutaciones del ADN, cada vez más precisas y rápidas. Dentro de este esquema, la combinación de las técnicas de Biología Molecular con tecnologías usadas en la microelectrónica, en la Química y en la Física de Materiales, junto con los sistemas de detección de señales han posibilitado la creación de una nueva técnica de análisis que se conoce como “biochips” ó microarreglos de ADN. En esta tesis, presentamos los resultados del diseño, construcción y control de un sistema mecatrónico, capaz de imprimir microarreglos de DNA. Desarrollamos el Hardware y Software del sistema. Construimos el sistema mecánico, describimos las funciones principales del diseño mecánico y la importancia de implementar circuitos electrónicos que permiten la sincronización en los movimientos del sistema mecatrónico. El software se desarrollo en lenguaje gráfico usando como herramienta LabView 7.1, que controla las salidas y entradas digitales que nos permiten la interacción remota y la programación de microarreglos en diferentes geometrías. Presentamos los diagramas de bloques que ejecuta el programa para comunicarse con el sistema mecatrónico. Incluimos también, el diagrama de flujo que lo controla para la fabricación de microarreglos. Finalmente, con el sistema en funcionamiento, mostramos la impresión de microarreglos con un sistema matricial cuadrado de cinco por cinco puntos.

---

---

## **ABSTRACT**

The modifications in bases expressions of DNA causes deep effects in biological organisms functions. Such modifications are responsible of too many different illness in our population. The searching of why those modifications happen, requires many time and lots of resources. Last years, Molecular Biology has improved in developing techniques to find sequence of DNA in order to find mutations inside of DNA with more precision and spending less time on it. The combination of different techniques has been required such as micro-electronics, Chemistry and Physics of Materials. These areas have been using optical systems in order to create a new analysis technique that is better known as “Biosensors or DNA microarrays”. In this thesis, We present to the reader, the results of the mechanical design, manufacturing and control of a mechatronic system which is able to print DNA microarrays. We developed Hardware and Software of the system. We describe the main functions of the mechanical functions but also, we describe the importance of implementing electronic circuits to sincronize the whole mechatronic system movements. The software was developed by LabView 7.1 professional version. The software is encharged of controlling digital input/outputs that let the user a remote interaction to control the mechatronic system. The software let the user to build microarrays with different geometries. We show block diagrams of the main software. We show the main flow diagram that controls the mechatronic system to build microarrays. Finally, we show a photo of a microarray printed on it. The microarray shows a matricial array of 5 spots per 5 spots.

A blue square graphic with the word 'Capítulo' in yellow serif font at the top and a large yellow number '1' in the center.

## INTRODUCCIÓN

---

Desde hace algunos siglos tanto la ciencia como la ingeniería han estado trabajando en conjunto, con el objetivo de entender e implementar instrumentos que favorezcan a la prevención de los distintos fenómenos, que se presentan a causa de la naturaleza, como son los fenómenos físicos, astronómicos, químicos, biológicos, entre muchos otros más. Gracias a que la ciencia aporta modelos teóricos sobre dichos fenómenos, es posible para la ingeniería desarrollar instrumentos que colaboren a comprobar de manera práctica tales modelos teóricos. Los instrumentos diseñados y fabricados por la ingeniería varían de acuerdo al área de estudio, por ejemplo en el área química se encuentran los ya bien conocidos termómetros, utilizados para medir las variaciones de temperatura en las reacciones químicas; en el área electrónica por ejemplo, se encuentran los llamados multímetros, utilizados para la medición de parámetros eléctricos, tales como la corriente, el voltaje, la resistencia, la capacitancia, etc.; en el área médica se utilizan los estetoscopios para obtener de manera auditiva los pulsos emitidos por el corazón. En resumen, es posible encontrar hoy en día, una diversidad de instrumentos para cada área y a su vez, es importante hacer énfasis que estos se encuentran en un proceso constante de renovación, conforme la ciencia va ampliando su conocimiento. En la actualidad la tendencia tecnológica para la fabricación de instrumentos exige a la ingeniería desarrollar con alta calidad, alta precisión y exactitud en la medición, además de minimizar los costos del equipo, minimizar el tamaño del instrumento con el objetivo de facilitar al usuario su manejo, entre otras características.

Dentro de los avances tecnológicos más importantes en instrumentos que hay en la actualidad, se encuentran los utilizados en el área biológica, los cuales son fabricados en un 90% con material orgánico, gracias a su diseño innovador y tecnológicamente avanzado, permite a los biólogos desarrollar investigación sobre el comportamiento y evolución de: células, proteínas, ADN, microorganismos, tejido, etc., con el objetivo de que los resultados obtenidos, colaboren con el área médica y alimenticia, ayudando así a satisfacer las correspondientes necesidades que día a día surgen en distintas poblaciones de gente a nivel mundial. Dichos instrumentos se les conoce con el nombre de **Biosensores**.

## **1.1 BIOSENSOR**

La definición actual de lo que es un biosensor nos dice que es un dispositivo compacto de análisis que incorpora un elemento de reconocimiento biológico (ácido nucleico, enzima, anticuerpo, receptor, tejido, célula), asociado a un sistema de transducción que permite procesar la señal producida por la interacción entre el elemento de reconocimiento y el analito.

## **1.2 FUNCIONAMIENTO DE UN BIOSENSOR**

El principio de detección de un biosensor se basa en la interacción específica entre el Compuesto o microorganismo de interés y el elemento de reconocimiento. Como resultado de esta unión se produce la variación de una o varias propiedades físico-químicas (pH, transferencia de electrones, de calor, cambio de potencial, de masa, variación de las propiedades ópticas, etc.) que detecta el transductor. Este sistema transforma la respuesta del elemento de reconocimiento en una señal electrónica indicativa de la presencia del analito (elemento que se somete al biosensor para ser comparado con el elemento de reconocimiento), sometido a estudio o proporcional a su concentración en la muestra. (Ver figura 1)

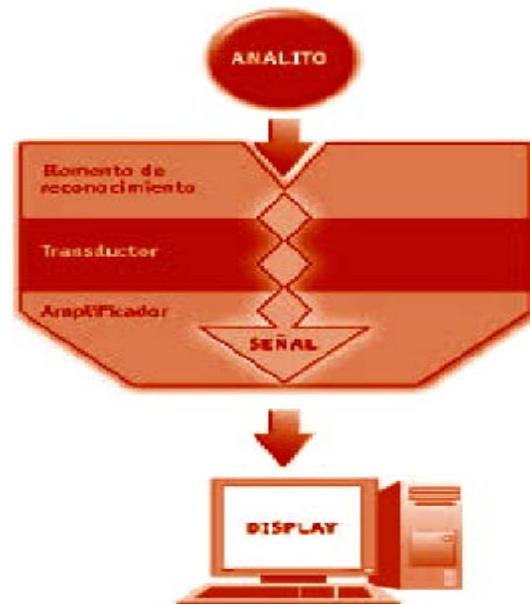


Figura 1. Representación esquemática del uso del biosensor y del proceso de adquisición del resultado.

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSENSORES

En las múltiples aplicaciones que tienen los biosensores para las diferentes áreas, es deseable que en general cuenten con las siguientes características:

- **Alta sensibilidad** para el análisis de ciertos analitos como por ejemplo, muchos compuestos xenobióticos con efectos tóxicos sobre la salud humana y animal incluso a concentraciones de partes por billón (mg/l). Existe unidades capaces de detectar cantidades inferiores a los límites exigidos por la ley en el caso de residuos de plaguicidas.
- **Alta selectividad** para que el dispositivo interaccione exclusivamente con el compuesto de interés y no con otros de propiedades similares. Se consigue mediante elementos de reconocimiento muy específicos. A pesar de ello, se conocen algunas excepciones de biosensores que sufren interferencias con sustancias de la misma familia que el analito.

- **Alta fiabilidad.** Los sistemas de transducción se diseñan de manera que no puedan ser alterados (o lo sean mínimamente) por la muestra y no tengan problemas de ruidos.
  
- **Tiempo de vida largo** que no obligue al empleo del dispositivo tras un corto de periodo desde su fabricación ni a sustituciones frecuentes del mismo si está integrado en la línea de producción de una industria. La estabilidad química, física y mecánica del elemento de reconocimiento condiciona su duración. Los componentes biológicos por su propia naturaleza cuentan con una vida media limitada pero las nuevas alternativas basadas en moléculas biomiméticas no presentan este inconveniente.
  
- **Bajo costo de producción.** En general, estos sistemas pueden fabricarse a escala industrial, lo cual redundaría en un más que considerable abaratamiento de los costos de producción. A pesar de ello, la disponibilidad ilimitada de algunas enzimas y la existencia de fases críticas en su construcción (procesos de inmovilización), dificultan en algunos casos, la fabricación de biosensores en masa.
  
- **Tiempo de análisis corto** que posibilite una actuación rápida, por ejemplo, la retirada de materias primas ó productos contaminados ó deteriorados antes de su uso ó venta ó la intervención para corregir algún parámetro en un proceso industrial. Muchos biosensores consumen pocos minutos en cuantificar el compuesto de interés y no precisan un periodo de espera largo hasta el siguiente análisis.
  
- **Pretratamiento** de la muestra **innecesario** lo que supone un ahorro de tiempo, materiales y reactivos. Aunque en la mayoría de las ocasiones esto es así, en ciertas determinaciones son imprescindibles las etapas de concentración y purificación. Estas permiten eliminar interferencias y asegurar la presencia de una cantidad suficiente del analito en el pequeño volumen utilizado (detección de microorganismos patógenos).
  
- **Manejo sencillo.** Esta tecnología no requiere personal calificado.

- **Capacidad de análisis en tiempo real.** Esta característica es interesante principalmente en procesos de control, ya que permite controlar los parámetros deseados de forma inmediata y automática. Sin embargo, esta característica depende del tipo de biosensor fabricado y en que se va a aplicar.
  
- **Portátiles:** para que sea posible realizar análisis *in situ*.
  
- **Automatizables.** Esto quiere decir, prescindir del control manual de estas unidades, lo cual facilita su integración dentro de los sistemas que monitorizan los procesos industriales.
  
- **Miniaturizables.** Gracias a los desarrollos en microelectrónica y nanotecnología se han logrado reducir las dimensiones de estos dispositivos. Así pueden ensamblarse varios de ellos en un mismo sistema que realiza varias tareas a la vez y son aplicables a ensayos, donde el tamaño físico del dispositivo, el volumen de la muestra ó localización de la medida son factores limitantes.
  
- **Requerimientos operativos.** Se requiere que estos sean pocos y de almacenamiento que faciliten su empleo y no supongan un coste adicional. Los biosensores que incorporan moléculas biomiméticas suelen presentar estas características. En el resto de dispositivos, los componentes biológicos pueden necesitar condiciones controladas (pH, temperatura), para su uso y conservación debido a su baja estabilidad.
  
- **Capacidad multi-análisis.** Ciertos biosensores llevan a cabo la determinación de diferentes analitos de forma simultánea.

Cabe mencionar que existe una amplia variedad de biosensores distintos y no todos poseen cada una de las características citadas anteriormente. La combinación de varias de ellas podría situar a muchos de estos dispositivos en una posición ventajosa frente a las técnicas de análisis convencionales (cromatografía, espectrometría, etc.), sin

embargo no es así, ya que los biosensores al igual que otros instrumentos de medición tienen limitantes.

## 1.4 CLASIFICACION DE LOS BIOSENSORES

En el mercado existen distintos tipos de biosensores que son utilizados para diferentes aplicaciones, donde la principal variación entre unos y otros se debe a su sistema de transducción, o sea a la forma de analizar la muestra para posteriormente convertir el resultado obtenido en un parámetro que pueda ser cuantizable tanto en magnitud como en unidades. Los biosensores más utilizados son:

- a) Biosensores Ópticos.
- b) Biosensores Nanomecánicos ó Microcantilevers.

**a) Biosensores ópticos:** Los biosensores ópticos pueden ser definidos como dispositivos que hacen uso de principios ópticos para llevar a cabo la transducción de una interacción bioquímica a una señal de salida adecuada e interpretable. La interacción biomolecular sobre la superficie de un sensor modula las características de la luz en el transductor por ejemplo: la intensidad, la fase, la polarización, etc.) y el elemento biosensado puede ser detectado por el cambio en propiedades ópticas tales como la absorción, fluorescencia, luminiscencia ó índice de refracción entre otras.

Los biosensores ópticos han tenido y siguen teniendo un gran impacto en la tecnología analítica para la detección de especies tanto químicas como biológicas. La tecnología de biosensado óptico puede ser una alternativa y/o un complemento de las técnicas analíticas convencionales que ayuden a minimizar costos, complejidad y sobre todo tiempos prolongados de detección. El sensado óptico ofrece muchas ventajas sobre su contraparte eléctrica, tales como la ausencia de riesgos por shock eléctrico ó explosiones, inmunidad a interferencias electromagnéticas, en general una alta sensibilidad y un ancho de banda muy amplio. Por otra parte, el uso de fibras ópticas para guiar la luz fuera del dispositivo para su captura en un equipo remoto es posible hacerlo.

El corazón de cualquier sensor óptico es una guía de onda óptica. Aunque las guías ópticas fueron desarrolladas originalmente para aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones, su estabilidad mecánica, su geometría flexible, inmunidad al ruido y eficiente conducción de luz a través de largas distancias las hacen instrumentos viables para su implementación en aplicaciones de sensores. Hasta la fecha, los sensores de guía de onda óptica han estado basados principalmente en fibras ópticas debido a su bajo costo, tamaño pequeño y geometría flexible [1]. Una desventaja es que las fibras ópticas no pueden ser diseñadas para ajustarse a una aplicación específica y uno se tiene que adaptar a lo que se encuentra disponible en el mercado.

Las aplicaciones de campo para los biosensores ópticos es amplia, cubriendo procesos clínicos, industriales, de control, veterinarias, alimenticias, y de monitoreo ambiental entre otras [1]. Para estas aplicaciones es deseable tener un sensor compacto de alta sensibilidad, de respuesta rápida y que sea capaz de llevar a cabo mediciones en tiempo real. Estos requerimientos pueden ser llevados a cabo principalmente con sensores ópticos debido a la naturaleza intrínseca de las mediciones ópticas, que agrupan un gran número de técnicas diferentes basadas en la emisión, absorción, fluorescencia, refractometría ó polarimetría.

Estas ventajas de sensado óptico son mejoradas significativamente cuando esta aproximación es usada en un esquema integrado [2]. La tecnología de óptica integrada permite la integración de muchos componentes ópticos pasivos y activos (incluyendo fibras, detectores, emisores, guías de onda, u otros componentes ópticos relacionados, etc.) dentro del mismo sustrato, permitiendo un desarrollo flexible de dispositivos de sensado miniaturizados compactos, con una posibilidad adicional de fabricación de múltiples sensores en un solo chip. Otras ventajas son la miniaturización, robustez, confiabilidad, producción potencial en masa con una consecuente reducción en costos de producción, bajo consumo de energía y simplicidad en el alineamiento de elementos ópticos individuales.

Los últimos desarrollos en el campo de óptica integrada han resultado en una clase innovativa de sensores micro ópticos exhibiendo capacidades biosensitivas comparables con la instrumentación analítica sofisticada de laboratorio. El principio de detección de muchos biosensores ópticos es una aplicación de detección de campo evanescente [3]. El principio de onda evanescente permite un monitoreo directo de cambios pequeños en las propiedades ópticas que son particularmente útiles en la detección de afinidad directa de la interacción biomolecular. El método de detección directa no es tan sensitiva como la indirecta, (por ejemplo: la fluorescencia ó amplificación de enzimas), pero generalmente no requiere una preparación previa de una muestra, y puede ser usado en evaluaciones de tiempo real, permitiendo la determinación de una biomolécula y de sus constantes cinéticas. Por otra parte, se evitan las molestias de etiquetas conjugadas ó del manejo de materiales radiactivos. Entre cientos de ejemplos investigados, en donde es usada esta técnica se encuentran las interacciones antígeno-anticuerpos, ingeniería de anticuerpos, receptor-ligando, proteína-DNA, DNA-intercalador, e interacciones DNA-DNA.

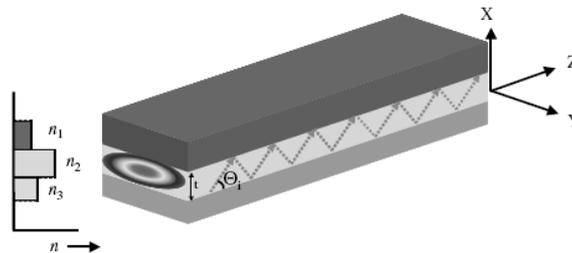
### **1.4.1 CLASIFICACION DE LOS BIOSENSORES OPTICOS.**

En la práctica es común clasificar los sensores ópticos por su tipo de efecto producido por la interacción entre receptor-analito debido al haz de luz entrante. A continuación se muestra en la tabla 1 los biosensores ópticos más utilizados:

- ❖ Fibras ópticas
- ❖ Sensores por resonancia de plasmones superficiales ó SPR.
- ❖ Guía de onda basada en SPR.
- ❖ Interferómetros integrados (Mach-Zehnder and Young interferómetros).
- ❖ Interferometría de modo diferencial.
- ❖ Espejo resonante.
- ❖ Acoplador bidirigido.
- ❖ Espectroscopia de interferencia reflectométrica. (RIFS)

## 1.4.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR OPTICO

El principio más común usado en biosensores ópticos para la detección en la parte real del índice de refracción es la detección evanescente, donde el transductor óptico se ve modificado por cambios en los parámetros ópticos del medio en contacto con el sensor de superficie que se encuentra en contacto con la onda de luz evanescente que penetra en el medio ambiente. Como la onda evanescente decae exponencialmente desde la superficie, la detección más sensitiva es solo en la superficie del transductor.



*Figura 2. Representación esquemática de una guía de onda plana de índice de refracción  $n_2$  rodeado por capas de índice de refracción más bajo ( $n_1$  y  $n_3$ ). La luz, encapsulada dentro de la estructura por TIR, viaja a través de modos guiados.*

Una guía de onda óptica es un índice refractivo alto situado entre dos materiales de un índice refractivo más bajo, como se muestra en la figura 2. Cuando un haz de luz tiene un ángulo excediendo el ángulo crítico, entonces ocurre una reflexión interna total (TIR) en las interfaces y, como una consecuencia la luz viaja dentro de la guía de onda, confinada dentro de la estructura. Un estudio detallado de cómo viaja la luz dentro de la guía de onda muestra que la luz es transmitida a través de un modelo de campo electromagnético llamado “modo guiado” como se muestra en la figura 3. En una guía de onda, tanto el campo eléctrico transversal (TE) y el campo magnético (TM) se pueden propagar [4]. Aunque la luz es encapsulada dentro de la guía de onda, hay una parte de ahí (campo evanescente) que viaja a través de una región que se extiende fuera, y que se encuentra alrededor de unos cientos de nanómetros dentro del medio que rodea a la guía de onda (Ver figura 3). Este hecho puede ser usado para propósitos de sensado.

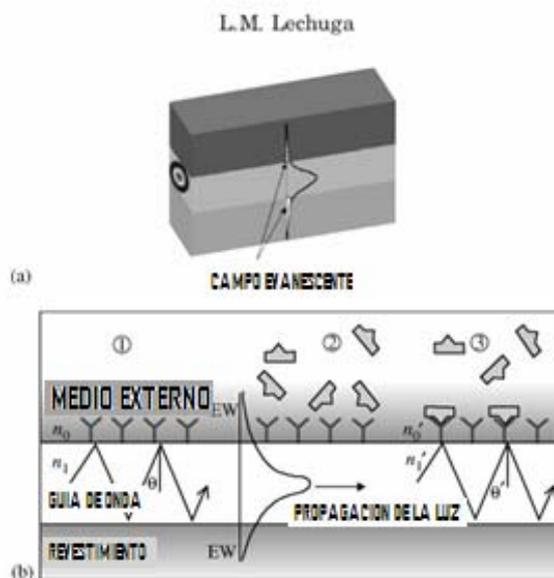


Figura 3. (a) Campo Evanescente de modo de propagación fundamental en una guía de onda óptica. (b) Interacción de onda evanescente con una reacción biomolecular para propósitos de sensado. La absorción de la capa receptora y el proceso de reconocimiento producen un cambio del índice de refracción efectivo de la guía de onda dentro del campo evanescente y este cambio es cuantitativamente relacionado con la concentración del analito a ser medido.

Cuando una capa receptora es inmovilizada dentro de la guía de onda, como se muestra en la figura 3, la exposición de tal superficie con la pareja de las moléculas del analito produce una reacción bioquímica que se lleva a cabo sobre la superficie de la guía de onda e induce un cambio en sus propiedades ópticas que dependerán de la concentración del analito y en la constante de afinidad de la interacción, por tanto se obtiene un sensor cuantitativo de tal interacción. La onda evanescente decae exponencialmente en la manera que este penetra el medio externo y por tanto, solo detecta esos cambios que se llevan a cabo sobre la superficie de la guía de onda, porque la intensidad del campo evanescente es mucho más alto en esta región [3]. Por tanto, no es necesario llevar a cabo una separación previa de componentes no específicos (lo cual es muy necesario en el análisis convencional), porque cualquier cambio en el volumen de la solución afectará fuertemente la respuesta del sensor [1].

De esta manera, los sensores de onda evanescente son dispositivos sensitivos y selectivos para la detección de niveles muy bajos de químicos y sustancias biológicas y para las mediciones de interacciones moleculares in situ y tiempo real.

El alcance del campo evanescente puede ser ajustado al momento de diseñar la guía de onda (espesor e índice de refracción), el largo de la guía de onda, su revestimiento y por cualquier capa aproximada con la guía de onda. Esto quiere decir que la estructura de una guía de onda puede ser ajustada a una situación de medición específica, seleccionando los materiales apropiados, la longitud de la guía, su geometría y su tecnología de manufacturación. Los materiales usados comúnmente para la fabricación de guías de onda son: vidrio, silicio y materiales relacionados, polímeros, niobio de litio, y compuestos del grupo III-V.

Las técnicas usadas usualmente para la fabricación de guías de onda son: por intercambio de iones, deposición por vapores químicos, sol-gel y polimerización por plasma, entre otros. Para el proceso de instalaciones especiales de guías de onda se requieren usualmente (principalmente facilidades de un cuarto limpio) que disminuya el acceso a este tipo de trabajo con este tipo de sensor [3,2]

### **1.4.3 BIOSENSOR POR FIBRA OPTICA**

Este tipo de biosensores se basan en la transmisión de luz a lo largo de un hilo de fibra hasta el lugar del análisis. Los biosensores de fibra óptica pueden ser clasificados en dos grupos principales: extrínsecos e intrínsecos como se muestra en la figura 4. Los sensores extrínsecos hacen uso de una sola fibra para guiar la entrada y la salida de luz. Los sensores intrínsecos se basan en la detección de la onda evanescente.

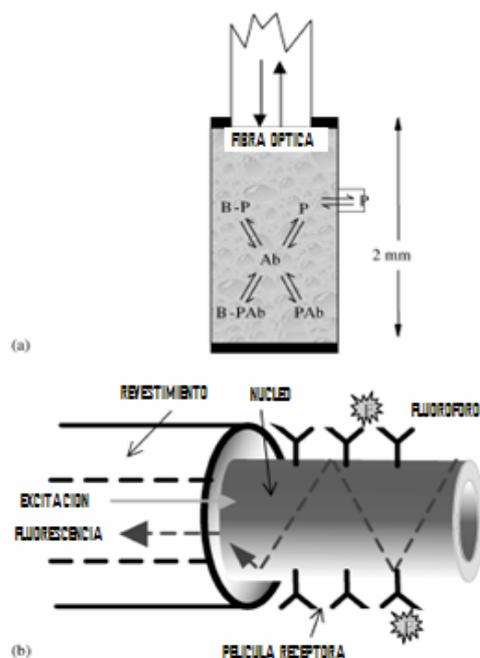


Figura 4. Biosensor de Fibra óptica. (a) Extrínseco: fibra óptica es usada para guiar la luz hasta y desde el área del sensor. (b) Intrínseco: Las moléculas receptoras son inmovilizadas en el núcleo de la fibra que se encuentra enseguida del revestimiento de la fibra. La detección se basa en las etiquetas fluorescentes.

En la técnica extrínseca, la luz proveniente de una fuente adecuada viaja a través de la fibra óptica de un punto a otro en donde en uno de los puntos se encuentra un sensor inmovilizado. La luz reflejada, emitida ó dispersada sale de la muestra y regresa por una segunda fibra óptica ó por bifurcación de la fibra original. La luz emitida es interpretada con un detector y es una medida de la concentración del analito de interés. El biosensor por fibra óptica más simple utiliza las mediciones de absorbancia para determinar cualquier cambio en la concentración del analito que absorbe una longitud de onda determinada. También es posible realizar mediciones de fluorescencia usando una etiqueta (Ver figura 4 (a)).

En los sensores intrínsecos, generalmente un encintado, fibra de silicio fundido es usado. Receptores biológicos especiales son inmovilizados mediante un proceso químico bien establecido.

Los cambios en la absorbancia, luminiscencia, polarización ó índice de refracción son detectados. Pero una medición directa es usualmente imposible y configuraciones competitivas son empleadas usando etiquetas fluorescentes (Ver figura 4 (b)). El desarrollo de tecnología de comunicación por fibra óptica ha proveído baja pérdida extremadamente, y componentes de fibra estables y fibras con interfaces estándar. Con el advenimiento de transductores ópticos, el mejoramiento de la electrónica, y métodos de inmovilización mejorados, los biosensores de fibra óptica están siendo aplicados en procesos industriales y en monitoreo ambiental, procesamiento de alimentos, y aplicaciones clínicas. Los biosensores de fibra óptica pueden ser miniaturizados fácilmente e integrados para la determinación de diferentes compuestos.

#### **1.4.4 BIOSENSOR POR RESONANCIA DE PLASMONES SUPERFICIALES ó SPR**

La técnica SPR es un fenómeno óptico debido a una oscilación por densidad de carga en la interfase de un metal y un dieléctrico, el cual tiene constantes dieléctricas de signos opuestos [5]. La excitación óptica de una superficie de plasmones puede ser conseguida cuando un haz de luz (polarizado p ó TM) incide en la superficie entre una capa de metal delgado y un medio dieléctrico a un ángulo definido, llamado ángulo de resonancia (Figura 5). Cuando la resonancia ocurre, un mínimo en la intensidad de la luz reflejada por el ángulo de resonancia es observado, el trazo del ángulo incidente contra la reflectividad muestra el declive a ese ángulo (Ver figura 5).

La onda del plasmon de superficie es excitada cuando la condición de resonancia es conseguida, por ejemplo, los vectores de propagación de ambas tanto del plasmon de superficie ( $k_{sp}$ ) y las ondas electromagnéticas incidentes ( $k_{x,d}$ ) son iguales. Cuando se iguala el vector de onda, su componente paralela a la superficie ( $k_{x,d}$ ) se debe de verificar la siguiente condición de resonancia:

$$k_{x,d} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_d} \cdot \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_m \cdot \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$$

Ecuación 1

Donde  $\theta$  es el ángulo incidente,  $\epsilon_m$  es la constante dieléctrica del metal y  $\epsilon_d$  es la constante dieléctrica del prisma. De la ecuación 1 se ve claramente que la propagación SPR puede ser válida solo si  $\epsilon_m < -\epsilon_d$ . Esto significa que el plasmon de superficie puede solo existir si la permeabilidad del dieléctrico del metal y el medio dieléctrico son opuestos en signo. Esta condición es conseguida solo a frecuencias desde el infrarrojo hacia la parte visible del espectro por muchos metales como el oro y la plata, que son los que se utilizan comúnmente para esta técnica.

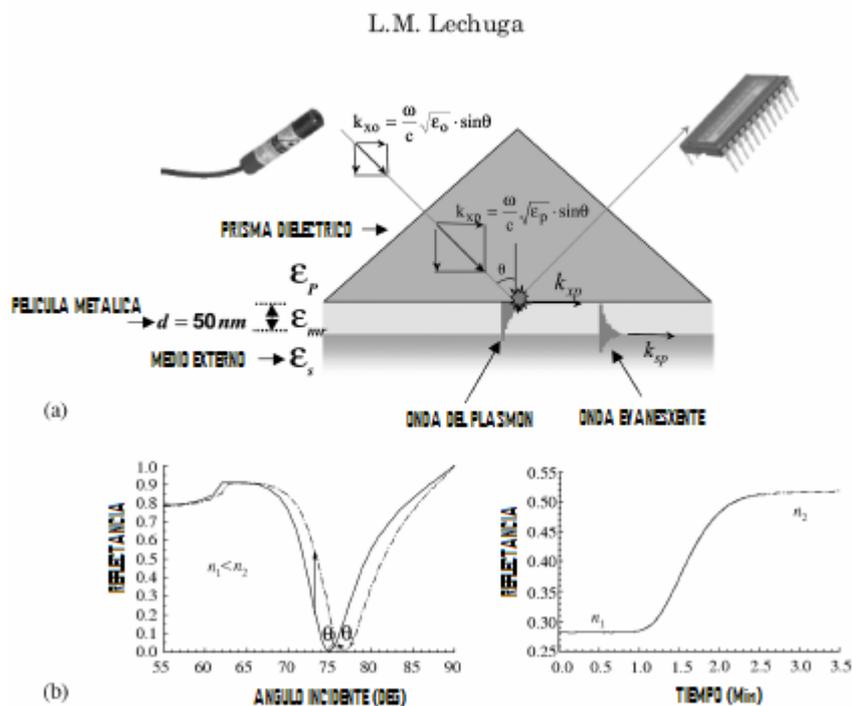


Figura 5 (a) Representación esquemática de la configuración de Kretschmann para un sensor SPR que muestra la excitación a través del campo evanescente ( $k$ =vector de onda de la luz incidente,  $\theta$  =ángulo incidente,  $\epsilon$  =constante dieléctrica). (b) Cambio en el índice de refracción hacia el medio externo del sensor SPR puede ser detectado midiendo el cambio de intensidad del haz reflejado (derecho) como una función del ángulo de incidencia (izquierdo) como función de tiempo a un ángulo fijo de incidencia.

El grosor de la película metálica es crítica para el valor de reflectancia mínimo y el grosor óptimo depende de las constantes ópticas del límite medio y de la longitud de onda de la luz [5]. Para el oro, el grosor óptimo es de 45 nm con una  $\lambda=790$  nm.

El ángulo de resonancia es muy sensible a las variaciones del índice de refracción del medio adyacente a la superficie del metal, el cual está dentro de la distancia de sensado del campo del plasmon y entonces cualquier cambio del índice de refracción tal como un cambio homogéneo del material (como un gas) ó una interacción química puede ser detectada a través del cambio en la posición angular del ángulo de resonancia del plasmon. En ambos casos, la curva SPR cambia hacia ángulos más elevados. Este hecho puede ser convertido en biosensor altamente específico para detectar interacciones bioespecíficas mediante la funcionalización de la superficie del biosensor para un analito en especial.

Usualmente, hay dos maneras de llevar a cabo una excitación óptica y lograr la condición de resonancia: la reflexión total de una estructura acoplada por prismas [6] y la difracción por difracción de rejillas [7]. El más común es el primero debido a su simplicidad y es llamada configuración de Kretschmann, mostrada en la figura 5 (a).

Cuando una luz monocromática es usada para excitar la respuesta SPR en la configuración Kretschmann, hay dos maneras de medición: para seguir la variación del ángulo de resonancia ó para seguir la intensidad de la luz reflejada a un ángulo fijo, como se muestra en el esquema de la figura 5 (b). En el primero (SPR angular), la muestra y el detector son fijados sobre un eje rotatorio en la cual ese detector se mueva dos veces la velocidad angular de la muestra. La condición de resonancia es observada como un pronunciamiento mínimo de la reflectancia de la luz, cuando el ángulo de incidencia es variado. Cuando una reacción bioquímica se lleva a cabo, un cambio en la curva de resonancia es observado. Este cambio puede ser relacionado cuantitativamente con el analito de interés.

Un escaneo angular no puede ofrecer mediciones de tiempo real, debido a que un escaneo simple se lleva muchos minutos. En el segundo caso, escogiendo un ángulo de incidencia a la mitad del ancho del declive resonante y midiendo la intensidad de la luz reflejada a ese ángulo constante, cercano a la resonancia del plasmon, cambios en tiempo real en el índice de refracción se deben al proceso de absorción de las moléculas sobre la superficie del metal pueden ser medidas con alta sensibilidad. Este tipo de medición puede ser aplicado solo cuando pequeños cambios en el índice de refracción son producidos como la región lineal es algo pequeña, por ejemplo en una interacción biomolecular. Un monitoreo continuo al mismo ángulo provee un análisis de tiempo real de los eventos involucrados ligados con la reacción. Una gran cantidad de información puede ser recolectada como por ejemplo: concentración, cinética, etc.

#### 1.4.5 APLICACIONES DE LOS BIOSENSORES OPTICOS

A pesar de las diferencias en los biosensores ópticos mencionados anteriormente, el diseño general de los experimentos es esencialmente la misma para cada instrumento. El procedimiento se muestra en la figura 6.

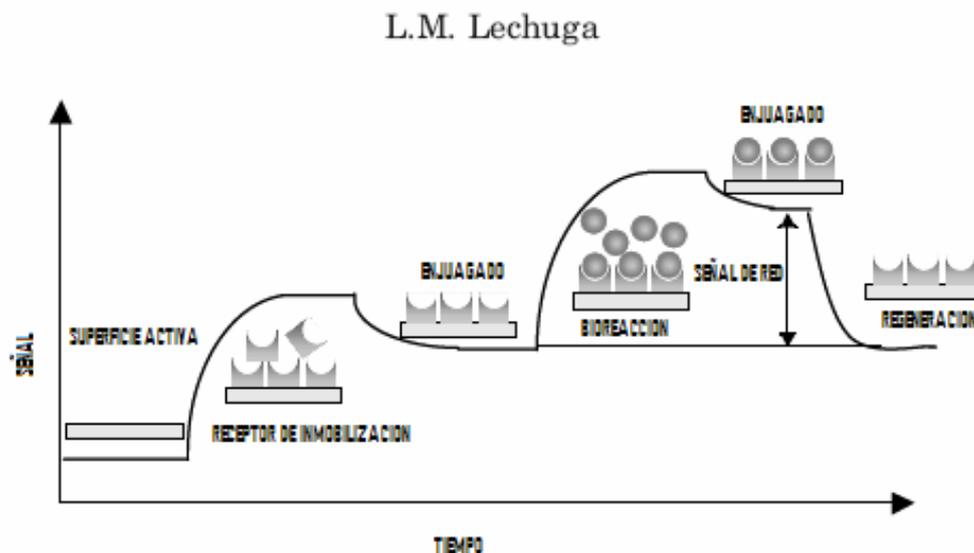


Figura 6. Curva de respuesta básica para cualquier biosensor de onda evanescente

Una de las parejas de interacción, como lo es el receptor se une al sensor de superficie (escogiendo el procedimiento de inmovilización). El analito se ata al receptor desde una solución libre. Para la mayoría de los biosensores ópticos, el dispositivo monitorea el cambio del índice de refracción en tiempo real y entonces, la cantidad de analito y el promedio ligado puede ser determinado.

Los experimentos pueden realizarse en tan solo minutos y solo se necesitan cantidades pequeñas de muestra. La posibilidad de observar interacciones directamente sin el uso de etiquetas es una de las ventajas que ofrece esta tecnología, además de facilitar el análisis cinético. La caracterización de la cinética y termodinámica de las interacciones macromoleculares con técnicas de biosensores, ayuda a contribuir con el entendimiento de las bases moleculares del reconocimiento biológico. Desde ahora, entender las fuerzas que determinan el reconocimiento molecular ayuda a idear mecanismos de procesos biológicos importantes y así facilitar el descubrimiento de métodos biotecnológicamente innovativos y materiales terapéuticos.

Los biosensores ópticos han sido aplicados en muchos campos extensivamente, tales como las ciencias de la vida, para control de calidad biotecnológica, en análisis clínico, control ambiental, monitoreo de fermentación, control de productos en comida e industria de bebidas, solo por mencionar algunas [8-11]. Pueden ser usados para estudiar una variedad de interacciones en sistemas biológicos de proteínas, oligonucleotidos, oligosacaridos, y lípidos, partículas virales y células [9], determinación de interacciones bacteriales y virales, entre proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos, micropurificación, y análisis de péptidos.

#### **1.4.6 BIOSENSORES NANOMECAÑICOS Ó MICROCANTILEVERS.**

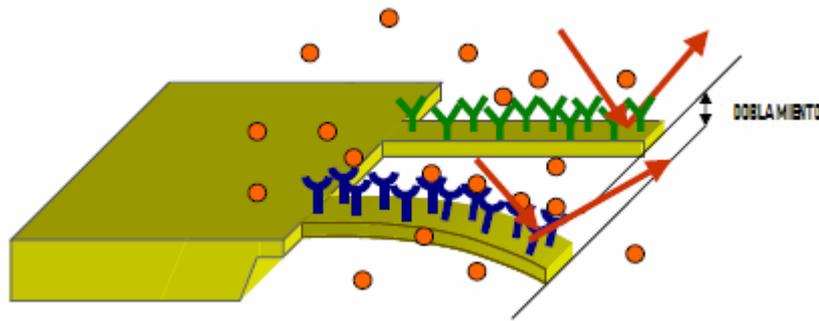
Los biosensores basados en microcantilevers han llegado a ser una herramienta prometedora para detectar directamente interacciones biomoleculares con gran precisión. Los microcantilevers traducen el reconocimiento molecular de las biomoléculas en un movimiento nanomecánico que es comúnmente acoplado a un sistema detector óptico ó piezoresistivo. Los biosensores basados en cantilevers son un buen ejemplo de cómo la nanotecnología y la biotecnología pueden trabajar en conjunto.

En la actualidad, han sido desarrolladas plataformas con arreglos de cantilevers para realizar mediciones simultáneas y leer así cientos de muestras. Como resultado, muchas aplicaciones interesantes han sido desarrolladas y comercializadas.

Los microcantilevers son fabricados típicamente de silicio/silicio nitrado ó materiales poliméricos, con dimensiones en el rango de 10 a 100  $\mu\text{m}$  de largo, y algunas décimas de  $\mu\text{m}$  de ancho y cientos de nm de espesor. Por otra parte, estos dispositivos pueden ser fabricados en arreglos de 10 a miles de microcantilevers, por tanto, estos pueden ser una alternativa para analizar DNA y proteínas, debido a que permiten monitoreo paralelo, rápido, en tiempo real de miles de analitos, sin la necesidad de etiquetarlos. Cuando se fabrican a nanoescala (nanocantilevers), la sensibilidad se reduce y los límites esperados de detección (LODs) son en rangos de femtomol (fmol) hasta mol átomo (amol) con posibilidades asombrosas de detección a una sola molécula en tiempo real [13].

Los microcantilevers pueden traducir un número diferente de fenómenos, tales como cambios de masa, temperatura, calor, ó tensión, en frecuencia de resonancia (modo dinámico) [2], que pueden ser monitoreados.

La absorción de moléculas, cuando son restringidas a una de las superficies de los cantilevers, produce una diferencia de tensión superficial que dobla al cantilever. Al mismo tiempo la frecuencia de resonancia del cantilever también varía debido a la carga de masa. El doblamiento y los cambios en la frecuencia de resonancia pueden ser monitoreados por diferentes técnicas, con deflexión de haz óptico, piezoresistividad, piezoelectricidad, Interferometría y capacitancia entre los más importantes [7]. Cambios en la frecuencia de resonancia pueden ser detectados midiendo el ruido térmico del cantilever. De alguna manera, para conseguir una gran sensibilidad, especialmente cuando se trabaja en líquidos, es necesario pre-energizar los cantilevers usando energía eléctrica alterna, magnética ó campos acústicos. (Ver figura 7)



*Figura 7. Esquema del doblamiento de un cantilever debido a una interacción biomolecular entre el receptor inmovilizado y su objetivo. Solo el reconocimiento específico causa un cambio sobre la tensión superficial producido por el doblamiento del cantilever.*

**a) LECTURA OPTICA:** La lectura óptica es uno de los esquemas más comunes para detectar el movimiento de los microcantilevers, como una derivación de AFM estándar. El desplazamiento del cantilever es medido usando deflexión óptica del haz láser incidente sobre una posición sensible del foto detector, que permite el valor absoluto del desplazamiento del cantilever a ser calculado (Ver figura 8(a) para detalles). Este método provee resoluciones de sub-angstroms (sub-Å) y puede ser implementado fácilmente. Las principales desventajas de esta técnica de lectura son, que requieren dispositivos externos para mediciones de deflexión, por tanto su alineamiento continuo y calibración son requeridos y eso consume mucho tiempo.

Técnicas ópticas son sensibles a cambios en la densidad óptica de la muestra y pueden también ser sujetas a artefactos, debido a cambios en las propiedades ópticas del medio que rodea al cantilever, y que pueden mover el punto del láser sobre la superficie del fotodetector. Además, la implementación de un método óptico para la lectura de los arreglos tecnológicamente un reto, debido a que requiere un de fuentes láser con el mismo número de elementos que el arreglo de cantilevers. La técnica es empleada en plataforma de arreglos comerciales óptimamente basados, pero switchheada secuencialmente en encendido y apagado de cada láser, ya que es necesario evitar el traslapamiento de los haces reflejados sobre el fotodetector.

Este problema puede ser resuelto elegantemente usando una fuente láser con escáner, donde el haz láser es escaneado a lo largo del arreglo para iluminar las puntas de cada cantilever secuencialmente [12].

Lechuga y al. Introdujeron un nuevo tipo de guía de onda óptica [14,5] que no necesita un arreglo de fuente láser debido a que el cantilever actúa por si mismo como guía de onda conduciendo la luz. A la salida del cantilever óptico, la luz puede ser recolectada por otra guía de onda ó por un fotodetector. Este nuevo dispositivo ha mostrado un buen desempeño y ofrece un interesante acercamiento a una integración más lejana en un microsistema denominado “laboratorio sobre un chip”.

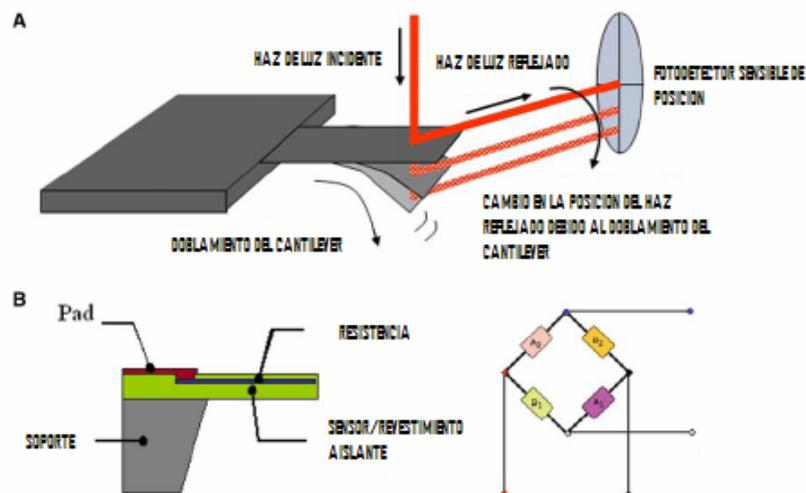


Figura 8. (a) Esquema del método de lectura óptica para la evaluación del doblamiento en un cantilever. (b) Esquema de lectura piezo-resistiva y configuración del puente de wheatstone.

**b) LECTURA PIEZO-RESISTIVA:** La lectura piezo-resistiva se basa en los cambios observados en la resistividad del material del cantilever como una consecuencia de un cambio en la superficie de tensión [15-19]. Un sensor piezo-resistivo mide la variación en la resistencia de una película con respecto a la tensión de superficie causada por el doblamiento específico de moléculas. Para que una piezo-resistividad sea observable, la conductividad eléctrica a lo largo del grosor del cantilever tiene que ser asimétrica, que es usualmente llevada a cabo por el dopaje diferencial del material. La fabricación de cantilevers de silicio piezo-resistivo es realizado por revestimiento asimétrico por ambos lados con silicio nitrado en tal forma que el eje neutral del cantilever quede dentro del revestimiento. Para medir el cambio en la resistencia, cantilevers de silicio deben de ser incluidos en un puente de wheatstone alimentado vía corriente directa. (Ver figura 8 (b)). Esta configuración es muy adecuada para integraciones lejanas dentro de los arreglos de los cantilevers [20].

Los cantilevers piezo-resistivos son comparados con los de lectura óptica, a continuación se muestran algunas ventajas:

- ❖ La detección piezo-resistivo puede trabajar en soluciones no transparentes.
- ❖ El tiempo consumido en la alineación del láser no es necesario.
- ❖ Los circuitos electrónicos de lectura pueden ser integrados dentro del mismo chip.
- ❖ El control de temperatura puede ser implementado fácilmente y son compatibles con la fabricación de miniaturización y fabricación de arreglos.
- ❖ La principal desventaja es el nivel de ruido intrínseco que afecta directamente la resolución y la sensibilidad cuando es comparada con cantilevers detectados ópticamente [21], aunque reducir el grosor de los cantilevers piezo-resistivos pudiera incrementar la sensibilidad.

### 1.4.7 APLICACIONES DE BIOSENSORES MICROCANTILEVERS

Un excelente ejemplo en el campo de la genómica fue la detección de una sola base con un LOD de 10 nM reportada por Fritz et al. [22]. Para tal detección, ellos usaron en un arreglo de dos cantilevers con un control (no complementario) oligonucleotido en uno de ellos y prueba de DNA (complementario) inmovilizado en el otro, dando señales de deflexión por hibridación de 10 nm y 16 nm por objetivos de 12-mer y 16-mer de DNA respectivamente y mostrando una deflexión por ruido de 0.5 nm.

McKendry et al. Detectada 75 nM de oligonucleotido usando un arreglo de 8 microcantilevers [4]. Ambos resultados incluyen inmovilización específica por microcapilaridad con una solución de 40 uM sin un cantilever de referencia [19].

Otros esquemas de detección de DNA han sido reportados, como por ejemplo el único que usa una captura de oligonucleotido combinado con una prueba de DNA adjuntada con una nanopartícula de oro. Este método puede detectar hasta 0.05nM y es capaz de discriminar un error simple medido por resonancia [23].

En la tabla 1 se muestra una comparación de los diferentes sistemas de transducción mencionados en este capítulo.

<i>Transductor</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Optrodos (Fibra óptica)	Flexibilidad. Bajo coste. Análisis <i>in situ</i> remoto. Análisis en tiempo real. Fácil miniaturización.	Requiere marcaje. Señal proporcional a la cantidad de analito. Vida limitada del componente biológico.
Resonancia de plasmones superficiales (SPR)	Fáciles de usar. Detección directa. Detección en tiempo real. Elevada sensibilidad. Muestras sin purificar.	Sensibles a temperatura. Ineficaz para diluidos (requiere preenriquecimiento). Ineficaz para pequeño tamaño. Elevado coste. (21)
Resonancia de espejos (SPR)	Mayor sensibilidad que SPR.	Elevado coste. (21)
Onda evanescente (EW)	Detección directa, rápida y selectiva del analito.	Requiere marcaje.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de diferentes sistemas de transducción.

**Resumen.** En este capítulo se dio la introducción al lector, sobre la importancia de la instrumentación hoy en día, así como de los diferentes instrumentos que existen en el mercado y en que áreas son aplicados. Debido a que el objetivo principal de esta tesis se basa en la fabricación de biosensores, fue necesario definir lo que era un biosensor, así como el funcionamiento del biosensor, clasificación del biosensor, características del biosensor, aplicación del biosensor de acuerdo a su composición, además de las ventajas y desventajas, tanto de la composición como del uso de un determinado biosensor para el área de aplicación correspondiente. Se explico también el manejo del biosensor para obtener el resultado de una muestra analizada, mediante el uso de los transductores. El biosensor principal de interés que se pretende fabricar en esta tesis, es un **biosensor de ADN**. Por tanto, el capítulo 2 tratará acerca de lo que es un biosensor de ADN, para qué se utiliza, que contiene, como se fabrica, como se obtienen los resultados, etc.

## REFERENCIAS DEL CAPITULO I

1. F.S. Ligler and C. Rowe Taitt (Eds.), Optical Biosensors: Present and future. Elsevier, Amsterdam, 2002.
2. C. Domínguez, L.M. Lechuga and J.A. Rodríguez, In: S. Alegret (Ed.), Integrated Analytical Systems. Elsevier, Amsterdam, 2003, ISBN: 0-444-51037-0.
3. R.P.H. Kooyman and L.M. Lechuga, In: E. Kress-Rogers (Ed.), Handbook of Biosensors: Medicine, Food and the Environment. CRC Press, FL, USA, 1997, pp. 169–196.
4. L.M. Lechuga, Quím. Anal., 19 (2000) 61–67.
5. H. Raether, Surface plasmons oscillations and their applications. Physics of Thin Films, Vol. 9. Academic Press, FL, USA, 1977, pp. 145–262.
6. J. Homola, Anal. Bioanal. Chem., 377 (2003) 528–539.
7. L.M. Lechuga, A. Calle and F. Prieto, Quím. Anal., 19 (2000) 54–60.
8. T. Weimar, Angew. Chem. Int. Ed., 39 (2000) 1219–1221.
9. T.A. Morton and D.G. Myszka, Methods Enzymol., 295 (1998) 268–294.
10. S. Marose, C. Lindemann, R. Ulber and T. Scheper, Trends Biotechnol., 17 (1999) 30–34.
11. R.L. Rich and D.G. Myszka, Trends Microbiol., 11 (2003) 124–133.
12. C.R. Lawrence and N.J. Geddes, In: E. Kress-Rogers (Ed.), Handbook of Biosensors: Medicine, Food and the Environment. CRC Press, FL, USA, 1997, pp. 149–167.

13. M. Mehrvar, C. Bis, J.M. Scharer, M. Moo-Young and H. Luong, *Anal. Sci.*, 6 (2000) 677–692.
14. J. Homola, S. Yee and D. Myszka, In: F.S. Ligler and C. Rowe Taitt (Eds.), *Optical Biosensors: Present and Future*. Elsevier, Amsterdam, 2002.
15. J. Homola, J. Ctyroky, M. Skalsky, J. Hradilova and P. Kolarova, *Sens. Actuators B*, 38/39 (1997) 286–290.
16. J. Dosta'lek, J. Ctyroky, J. Homola, E. Brynda, M. Skalsky, P. Nektivdova', J. Skvor and J. Schro'fel, *Sens. Actuators B*, 3722 (2001) 1–5.
17. J. Homola, H.B. Lu, G.G. Nenninger, J. Dosta'lek and S.S. Yee, *Sens. Actuators B*, 3786 (2001) 1–8.
18. A.A. Kolomenskii, P.D. Gershon and A. Schuessler, *Appl. Opt.*, 36 (1997) 6539–6547.
19. T. Chinowsky, L. Jung and S. Yee, *Sens. Actuators B*, 54 (1999) 89–97.
20. W.M. Mullett, E.P.C. Lai and J.M. Yeung, *Methods*, 22 (2000) 77–91.
21. T. Akimoto, S. Sasaki, K. Ikebukuro and I. Karube, *Biosens. Bioelectron.*, 15 (2000) 355–362.
22. P.D. Hansen and A. Usedom, In: F.W. Scheller, F. Schubert and J. Fedrowitz (Eds.), *Frontiers in Biosensorics II*. Birkha'user Verlag, Switzerland, 1997.
23. S. Busse, M. DePaoli, G. Wenz and S. Mittler, *Sens. Actuators B*, 80 (2001) 116–124.

A blue square with the word 'Capítulo' in yellow serif font at the top and a large yellow number '2' in the center.

## BIOSENSORES DE ADN

---

### INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones que se tiene a nivel mundial es el control y prevención de las distintas enfermedades que se van originando y que muchas de ellas terminan con la vida de poblaciones enteras de gente cada segundo, es por eso que desde finales del siglo XIX, los progresos en las denominadas Ciencias de la Vida han permitido un aumento en la expectativa de vida de las personas y una mejora en su calidad de vida. Esto se vio favorecido por los avances logrados en las últimas décadas en el conocimiento de las estructuras y mecanismos moleculares que comprenden los procesos vitales, lo que ha permitido no sólo el desarrollo de nuevos fármacos sino también la mejora de los sistemas de prevención y diagnóstico de enfermedades. Durante el siglo XX se originó un proyecto cuyo objetivo principal fue el estudio del genoma humano que permite acelerar la identificación de genes causantes de enfermedades, además de facilitar el desarrollo de herramientas diagnósticas que además de identificar individuos portadores de genes defectuosos, permitirá en muchos casos conocer la enfermedad antes de que aparezcan los síntomas y practicar una medicina preventiva. El área encargada del desarrollo e implementación de tales herramientas es la Ingeniería Genética.

La ingeniería genética ha utilizado la combinación de las técnicas de Biología Molecular con tecnologías usadas en la microelectrónica, en la Química y en la Física de Materiales, junto con los sistemas de detección de señales, lo cual ha posibilitado la creación de una nueva técnica de análisis que se conoce como “**biosensores o micro arreglos de ADN**”. Antes de definir lo que es un biosensor de ADN se definirá primeramente lo que es el ADN [1] .

## 2.1 ¿QUE ES EL ADN?

El ADN significa **Ácido Desoxirribonucleico** y es la sustancia química donde se almacenan las instrucciones genéticas de un ser vivo. El ADN es visualizado como una molécula de longitud gigantesca, que está formada por agregación de tres tipos de sustancias: azúcares, llamados desoxirribosas, el ácido fosfórico, y bases nitrogenadas de cuatro tipos, la adenina, la guanina, la timina y la citosina. Los azúcares y los ácidos fosfóricos se unen lineal y alternativamente, formando dos largas cadenas que se enrollan en hélice.

Las bases nitrogenadas se encuentran en el interior de esta doble hélice y forman una estructura similar a los peldaños de una escalera. Se unen a las cadenas mediante un enlace con los azúcares.

Cada peldaño está formado por la unión de dos bases, formando los pares de bases anteriormente mencionados; pero estos emparejamientos sólo pueden darse entre la adenina y la timina o entre la citosina y la guanina.

Las secuencias -el orden en que se van poniendo- que forman adenina, timina, citosina y guanina a lo largo de la cadena de ADN es lo que determina las instrucciones biológicas que contiene. (Ver figura 9)

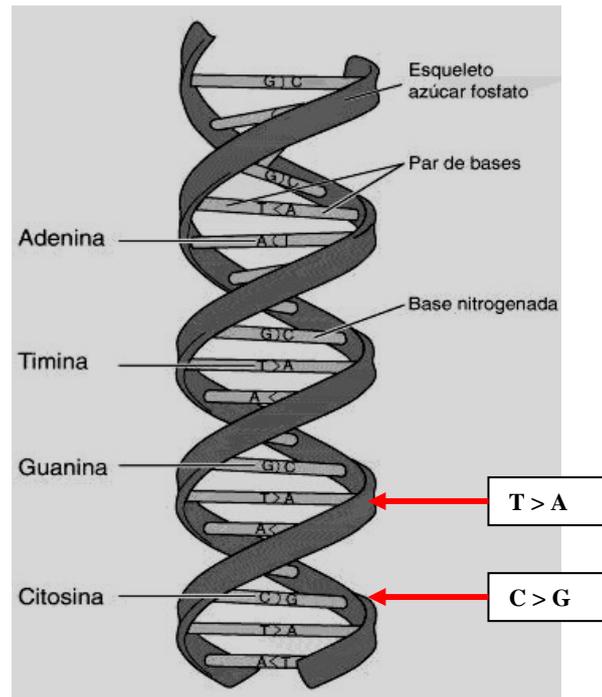


Fig. 9 Representación del ADN

La hélice del ADN mide 3,4 [nm](#) de paso de rosca y 2,37 nm de diámetro, y está formada, en cada vuelta, por 10,4 pares de nucleótidos enfrentados entre sí por sus bases nitrogenadas. El rasgo fundamental es que cada base nitrogenada de una hebra "casa" con la base de la otra, en el sentido de que la adenina siempre se enfrenta a la timina (lo que se denomina **A-T**) y la guanina siempre a la citosina (**G-C**). La adenina se une a la timina mediante dos puentes de hidrógeno, mientras que la guanina y la citosina lo hacen mediante tres puentes de hidrógeno; de ahí que una cadena de ADN que posea un mayor número de parejas de C-G para que este sea más estable.

El ADN a su vez, interactúa con un **ARN**. El ácido ribonucleico (**ARN**) es un ácido nucleico, polímero lineal de nucleótidos que forma una larga cadena. El eje de la cadena lo forman grupos fosfato y azúcares ribosa de forma alternativa del que toma su nombre. Los nucleótidos del ARN contienen el azúcar ribosa y la base nitrogenada uracilo, a diferencia del ácido desoxirribonucleico (ADN) que contiene desoxirribosa y timina.

La función principal del ARN es servir como intermediario de la información que lleva el ADN en forma de genes y la proteína final codificada por esos genes. El ARN es transcrito desde el ADN por enzimas llamadas ARN polimerasas y procesado por muchas más proteínas.

El código genético de las células se encuentra en forma de ADN. Dentro de las moléculas de ADN se encuentra la información necesaria para sintetizar las proteínas que utiliza el organismo; pero el proceso no es lineal, es bastante complejo. El ADN no se traduce directamente en proteínas.

En las células eucariotas el ADN se encuentra encerrado en el núcleo. La síntesis de ADN se hace en el núcleo, así como también la síntesis de ARN, pero la síntesis de proteínas ocurre en el citoplasma. El mecanismo por el cual la información se trasvasa desde el núcleo celular al citoplasma es mediante la transcripción del ARN a partir del ADN y de la traducción de proteínas a partir de ARN.

Parte del ADN se transcribe (es decir, se copia) en ARN. El ARN va como un mensajero al citoplasma y allí el ribosoma es el lugar físico para la traducción de los genes a proteínas. Por eso, ese ARN capaz de llevar el mensaje desde el núcleo al citoplasma se llama ARN mensajero.

El uracilo, aunque es muy diferente, puede formar puentes de hidrógeno con la adenina, lo mismo que la timina. El porqué el ARN contiene uracilo en vez de timina es un enigma del que nadie sabe la respuesta.

El ARN es el principal material genético usado en los organismos llamados virus, y el ARN también es importante en la producción de proteínas en otros organismos vivos. El ARN puede moverse dentro de las células de los organismos vivos y por consiguiente sirve como una suerte de mensajero genético, transmitiendo la información guardada en el ADN de la célula, desde el núcleo hacia otras partes de la célula donde se usa para ayudar a producir proteínas.

El ARN se transcribe a partir de una de las dos cadenas del ADN. En caso contrario, de una de las hélices saldría una proteína y de la otra algo totalmente diferente. Por ejemplo, si en una de las cadenas de ADN hubiera: GATACA, en la otra debería haber: CTATGT. La primera al transcribirse a ARN daría dos codones: GAU-ACA. La segunda CUA-UGU.

La primera formaría la cadena de aminoácidos siguiente. En el primer caso: Ácido Aspártico-Treonina y en el segundo caso: Leucina-Cisteína. Que sólo se transcriba una hélice no significa que siempre sea la misma a lo largo de todo el cromosoma. Puede transcribirse una hélice en un sitio y otra en otro. En la traducción de codones a aminoácidos intervienen otras moléculas de ARN, las llamadas ARN de transferencia.

Algunas moléculas de ARN presentan actividad catalítica, y son conocidas como ribozimas. La mayoría de los ARN son auto catalíticos, ya que catalizan su propio procesamiento. Su hallazgo es relativamente reciente, y antes se consideraba que solo las proteínas eran las únicas macromoléculas capaces de poseer actividad catalítica.

## 2.2 ¿QUE ES UN BIOSENSOR DE ADN?

Un biosensor de ADN es un dispositivo que contiene cadenas de ADN depositadas sobre un portaobjetos de vidrio y ordenadas de forma matricial (Ver Figura 10). Mediante este dispositivo, los biólogos realizan investigaciones sobre alteraciones o mutaciones del ADN humano, con el objetivo de entender y hasta predecir con anticipación ciertas enfermedades, como por ejemplo: el dengue, la amibiasis, el cáncer cérvico uterino, etc [2,3].

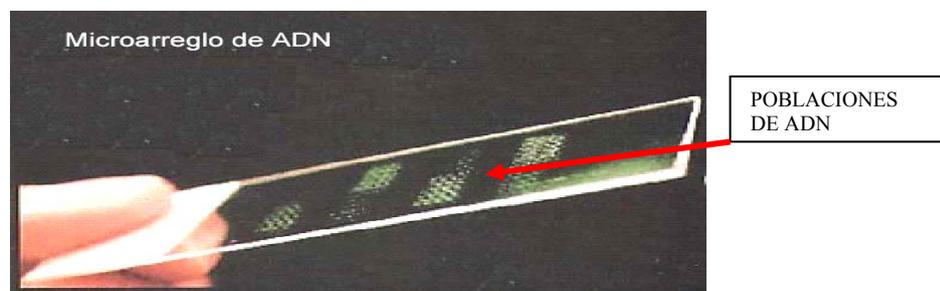


Figura 10. Fotografía de un biosensor de ADN

## 2.3 DIMENSIONES DE UN BIOSENSOR DE ADN

Como ya se menciona en el párrafo anterior, un biosensor se construye sobre un portaobjetos de vidrio. Las dimensiones de este portaobjetos son de 1" x 3" (2.5cm x 7.5 cm). Dentro de estas dimensiones es posible depositar aproximadamente 2,000 muestras de ADN, distribuidas simétricamente [5].

## 2.4 ¿COMO SE FABRICA UN BIOSENSOR DE ADN?

Para fabricar un biosensor de ADN se requiere el uso de un sistema automatizado mecánicamente y electrónicamente, que proporcione la precisión y la exactitud adecuada para poder distribuir las muestras de ADN sobre las cortas dimensiones del portaobjetos. A estos sistemas automatizados, se les conoce comúnmente como robots.

En la actualidad, ya existen en el mercado una gran variedad de robots que están diseñados para fabricar biosensores. Uno de estos robots, es el modelo *GENETAC G3* fabricado por la compañía *Genomic Solutions®*. (Ver figura 11)

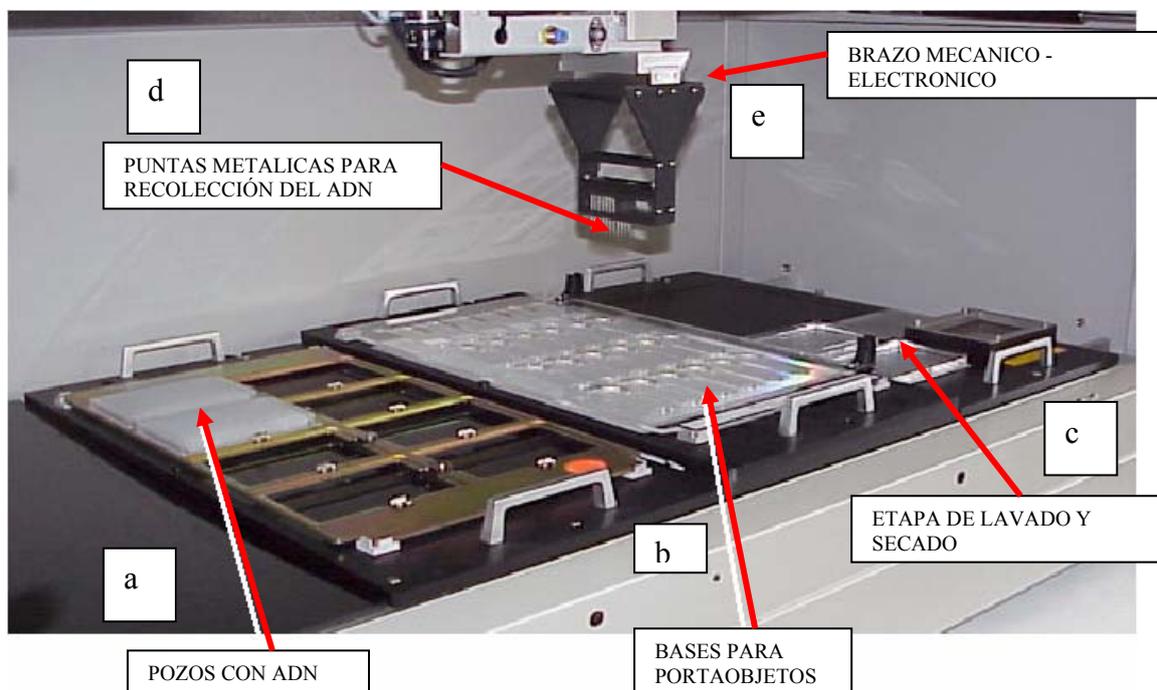


Figura 11. Robot utilizado para la fabricación de biosensores de ADN, modelo *GENETAC G3*, fabricado por la compañía *GENOMIC Solutions®*

**DESCRIPCION DE LAS ETAPAS:**

**a) Pozos con solución de ADN:** Dentro de estos pozos se encuentra la solución líquida que contiene muestras de ADN de seres humanos.

**b) Base para portaobjetos:** Las bases que contiene el robot sirven para sujetar los portaobjetos de vidrio en donde se pretende construir los microarreglos ó biosensores de ADN y así evitar movimientos innecesarios que perjudiquen la simetría de los spots (puntos) de ADN.

**c) Etapa de lavado y secado:** En la etapa de lavado se esterilizan las puntas mediante alcoholes y otras soluciones, que posteriormente son retiradas en la etapa de secado. En esta etapa se cuenta con un sistema de ultrasonido que ayuda a retirar la mayor parte de estas soluciones. Un sistema de luz infrarroja se encarga de aplicar el secado final.

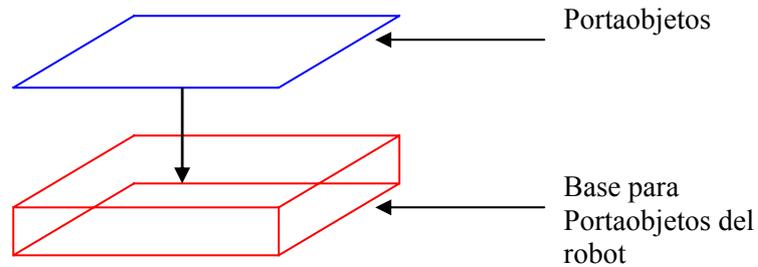
**d) Puntas metálicas:** Estas puntas son fabricadas de un material inerte como es: tungsteno, oro ó plata. La función principal de estas puntas es recolectar por el proceso de capilaridad (recolección por toque), una porción de solución de ADN contenida en los pozos. (Inciso (a)).

**e) Brazo mecánico – electrónico:** Este brazo contiene motores de corriente directa y motores a pasos, controlados por un sistema electrónico que se encarga de sincronizar los desplazamientos de las puntas metálicas (Inciso (d)), que se encuentran sujetadas a él. Este brazo es el encargado de ir formando el arreglo matricial de los spots de ADN sobre el portaobjetos de vidrio.

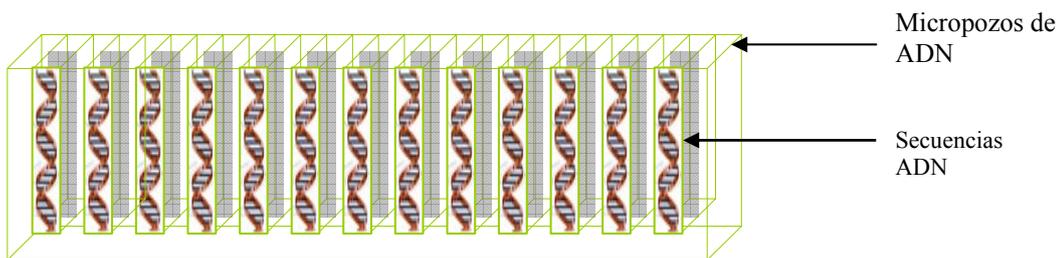
Para la manipulación del robot es necesario el uso de una computadora que se encargue de enviar las señales de control del sistema mecánico – electrónico y que a su vez, permita al usuario seleccionar el número de microarreglos que se van a fabricar.

## 2.5 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

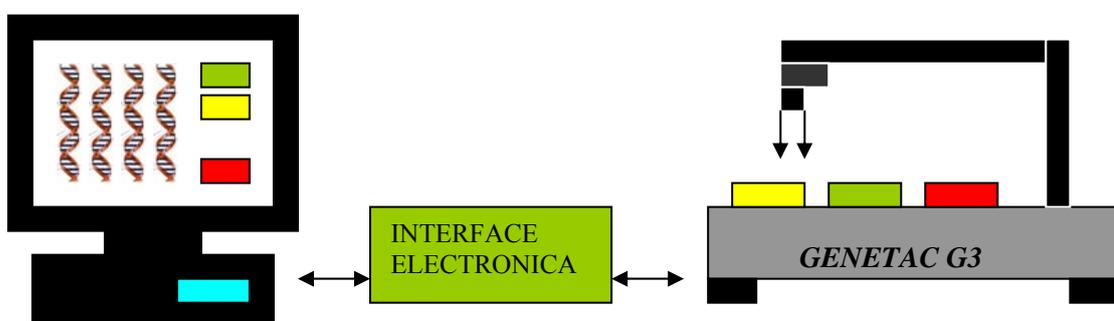
- 1) El usuario coloca la cantidad de portaobjetos que va a utilizar sobre cada base para portaobjetos.



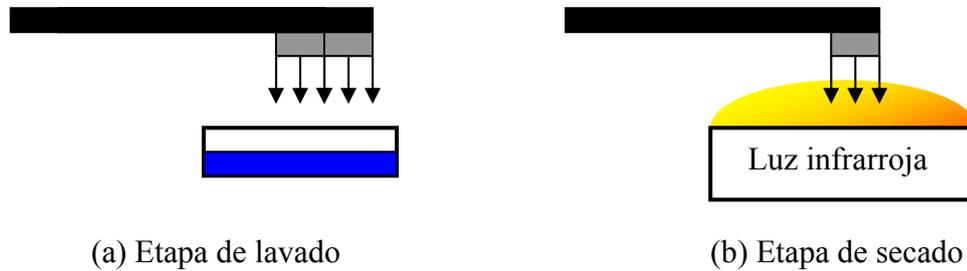
- 2) Una vez colocados los portaobjetos sobre las bases, el usuario deposita la solución de ADN sobre cada uno de los micropozos.



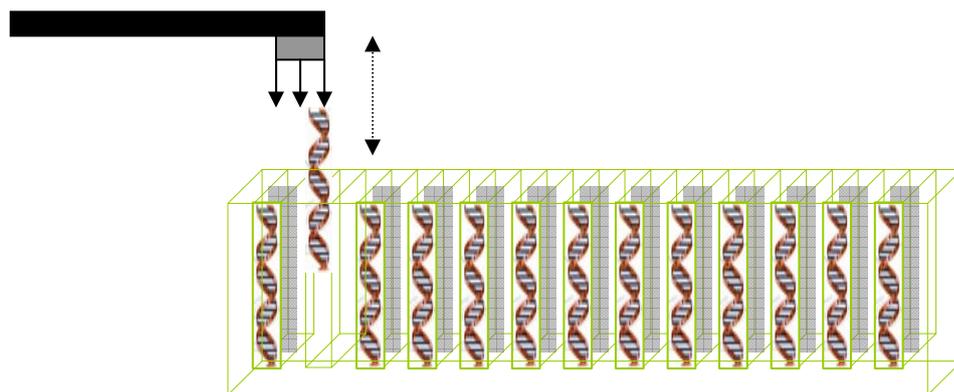
- 3) Mediante una computadora y un software precargado, se selecciona la cantidad de microarreglos que se desean fabricar y se da la instrucción de inicio de proceso.



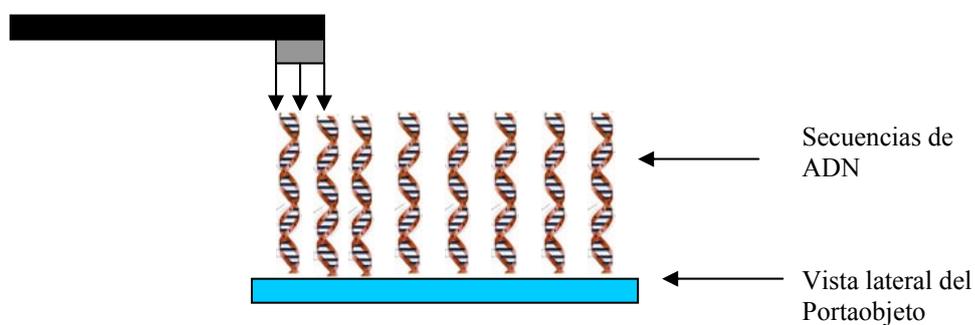
- 4) Una vez que se ha dado la instrucción de inicio, el robot dirige las puntas metálicas hacia la etapa de lavado (a) y secado (b).



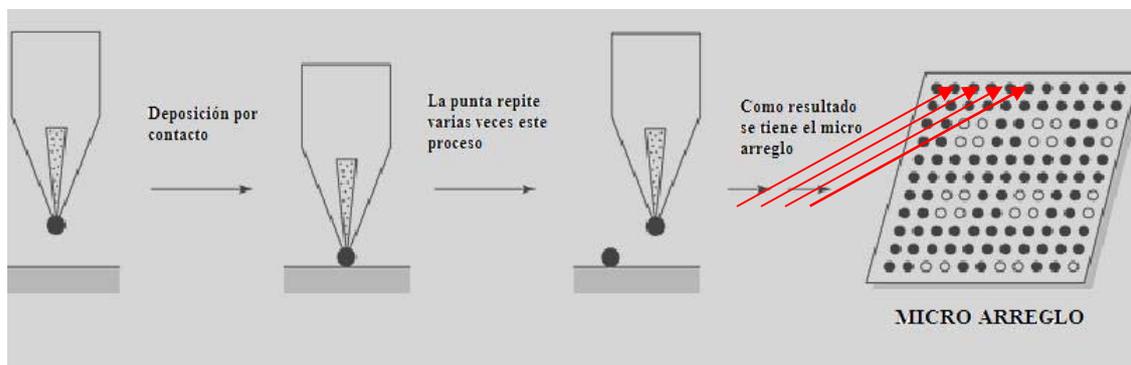
- 5) Después de la etapa anterior el robot dirige las puntas metálicas hacia los micropozos de ADN y por proceso de capilaridad toma una cantidad de 250 nl. de solución de ADN.



- 6) Posteriormente, el robot dirige las puntas hasta el primer portaobjetos y deposita tan solo 0.25 nl de la solución de ADN.



- 7) Nuevamente, repite los puntos del 4 al 6 hasta terminar el arreglo por cada portaobjetos (Ver figura 12).



*Figura 12. Proceso de deposición de ADN por capilaridad. En la figura se muestra como es que la punta recoge y deposita una determinada cantidad de ADN sobre el portaobjetos hasta terminar los arreglos necesarios.*

Al finalizar el proceso de fabricación, las muestras tienen la apariencia de diminutas gotas. A estas gotas se les conoce también con el nombre de “spots de ADN”. Para el caso particular del GENETAC G3, la distancia mínima que éste puede colocar entre centro y centro de cada spot es de 500  $\mu\text{m}$  y un diámetro de por spot de 300  $\mu\text{m}$  [7].

## 2.6 ¿CÓMO SE UTILIZA UN BIOSENSOR?

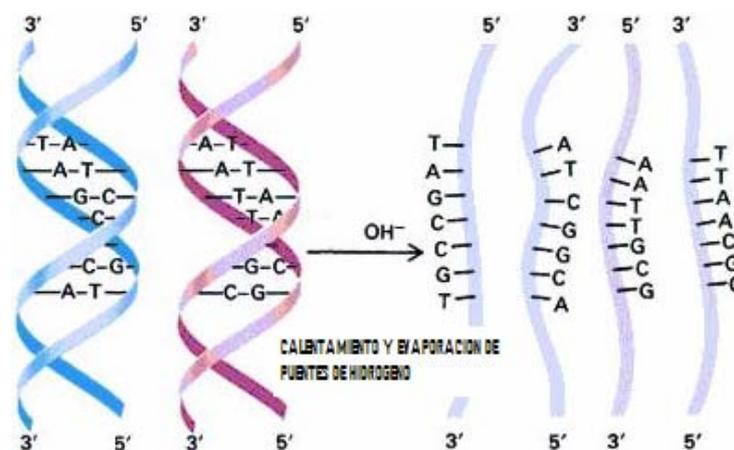
El biosensor fabricado se somete a un proceso llamado “*hibridación del ADN*”. Este proceso es una parte esencial para comprobar si realmente hay mutaciones en los ADN’s analizados. A continuación se explicara brevemente que es la hibridación del ADN.

## 2.7 HIBRIDACIÓN DEL ADN

La hibridación del ADN es el proceso que se utiliza para detectar un gen particular ó un segmento de un ácido nucleico.

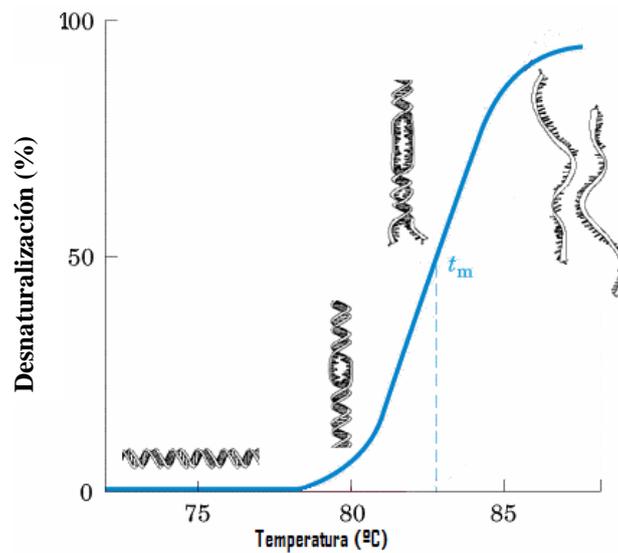
El objetivo de este proceso es separar las hélices que forman una cadena de ADN determinada, para tratar posteriormente, de unir una hélice de ADN externa que no pertenece a la de la cadena original, con una hélice de la cadena original. Existen dos métodos para lograr este objetivo. El primero es el método de desnaturalización y el segundo es el método de naturalización.

- ❖ **Método de desnaturalización:** El método de desnaturalización consiste en romper las fuerzas de unión entre las dos hélices del ADN. La manera más común de llevar esto a cabo es aplicando un calentamiento a la cadena de ADN con una temperatura determinada (Ver figura 13).



*Figura 13. A la izquierda se muestran dos hélices de ADN antes de ser sometidas al proceso de desnaturalización; a la derecha se muestran hélices de ADN independientes, después de haber sido sometidas al proceso de desnaturalización.*

En la gráfica 1 se muestra la desnaturalización en función de la temperatura. A la curva en donde se lleva a cabo la ruptura del enlace de las hélices del ADN se le llama curva de fusión del DNA, donde  $t_m$  es la temperatura de fusión.



Gráfica 1. En esta gráfica se muestra la temperatura aproximada a la cual surge la desnaturalización del ADN.

- ❖ **Método de renaturalización:** La renaturalización es el proceso inverso de la desnaturalización. Esto quiere decir, que hay que unir las hélices individuales, para formar nuevamente una hélice doble.

Para poder llevar a cabo la renaturalización, deben de cumplirse los siguientes puntos:

- a) La concentración salina debe ser alta ( $[\text{NaCl}]$  entre 0,15 y 0,5 M) para eliminar la repulsión entre los grupos fosfato de las dos hebras.
- b) La temperatura deber ser lo suficientemente elevada como para romper los puentes de hidrógeno intracatenarios producidos al azar en el DNA monocatenario, y lo suficientemente baja como para estabilizar los apareamientos correctos entre las bases de hebras distintas. La temperatura óptima de renaturalización es de unos 20 a 25 °C por debajo de la  $T_m$ .

Debido a que la renaturalización es un fenómeno de unión al azar, entonces la molécula de ADN renaturalizada no contiene las hélices originales que se encontraban hasta antes de la desnaturalización (Ver figura 14).

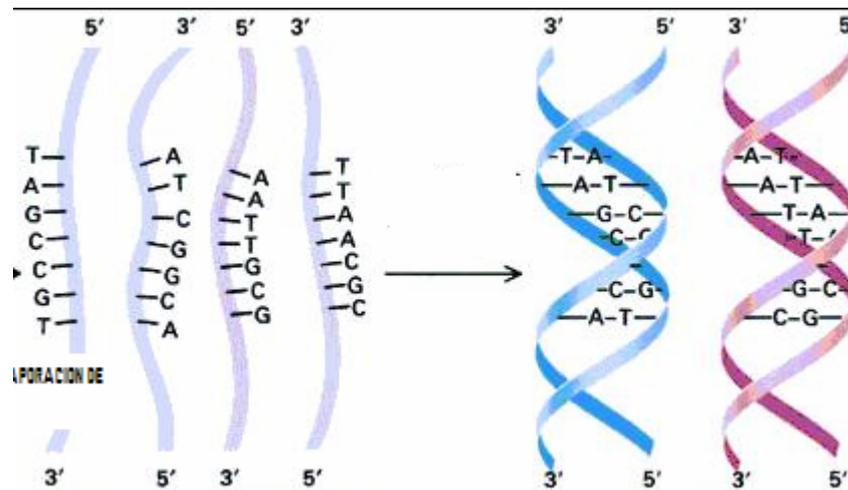
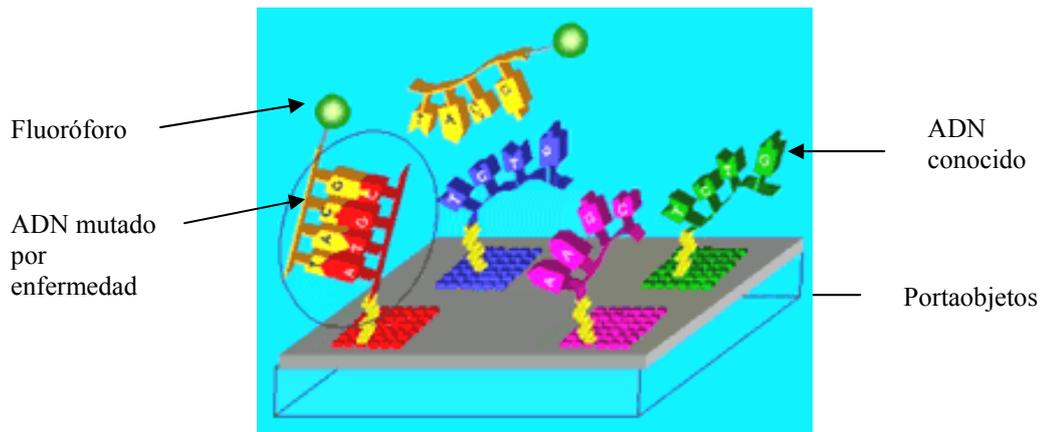


Figura 14. A la izquierda se muestran dos hélices de ADN desnaturadas; a la derecha se muestran las hélices de ADN, después de haber sido sometidas al proceso de renaturalización.

La hibridación es un pre-proceso fundamental para analizar las poblaciones de ADN que contiene el microarreglo. A este método se añade una etapa cuya función es el uso de fragmentos de ADN marcados radiactivamente con sustancias biológicas llamados fluoróforos y son conocidos como sondas.

Estos marcadores ayudan a los biólogos a conocer cuando se lleva a cabo una unión perfecta entre el ADN que se desea analizar y un ADN que contiene una mutación, donde dicha mutación dependerá de la enfermedad que se está analizando (Ver figura 15).



*Figura 15. En esta ilustración se muestra el esquema de una población conocida de ADN sometida a un proceso de hibridación. Nótese que el ADN mutado que se hibrida contiene un marcador biológico (fluoróforo) en uno de los extremos de la hélice*

Una vez sometido ha este proceso, el biosensor es analizado mediante una de las técnicas mencionadas en el capítulo I como son: ópticas (Resonancia de Plasmones Superficiales ó SPR, efecto raman, etc.), ó mecánicas (microcantilevers), ya que a simple vista es imposible visualizar los resultados.

En la actualidad existen en el mercado instrumentos que tienen integrado un sistema óptico – electrónico, cuyo principio de funcionamiento, se basa en las técnicas mencionadas en el párrafo anterior.

Uno de estos instrumentos es el modelo GeneTAC LSIV fabricado por la compañía Genomic Solutions (Ver figura 16).



*Figura 16. Sistema óptico de escaneo para microarreglos de la marca Genomic Solutions, modelo GeneTAC LSIV.*

Este sistema internamente está compuesto por un sistema de lentes ópticas, además de fuentes láser, sistemas de filtrado óptico y procesamiento digital de señales que ayudan a enviar los datos adquiridos a una computadora remota (Ver figura 17).

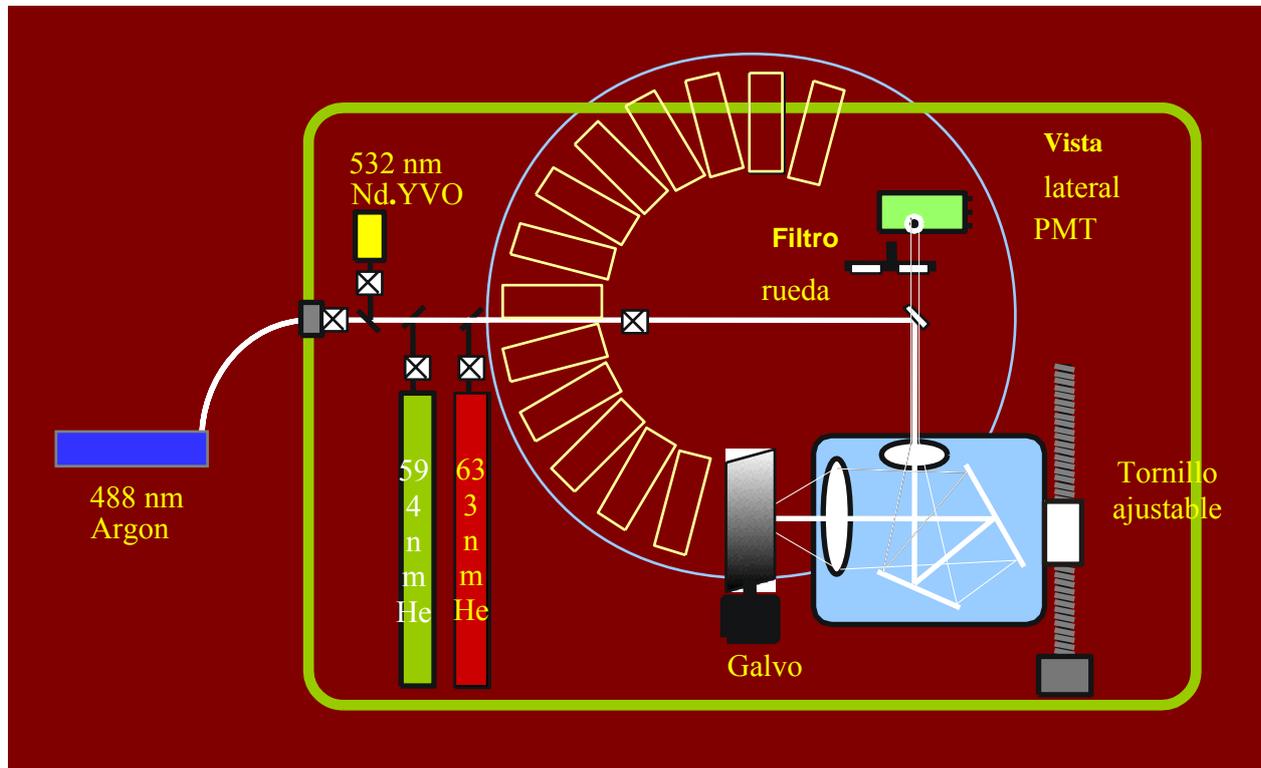


Figura 17. Esquema interno del sistema de procesamiento óptico digital GeneTAC LSIV.

Una vez procesados los datos, un software ayuda a recolectar y visualizar los datos adquiridos para que posteriormente sean presentados en pantalla y el usuario pueda visualizar en que spots ocurrió unión perfecta entre los ADN's hibridados.

Mediante el cambio de coloración de los spots es posible que el biólogo pueda determinar posibles mutaciones (Ver figura 18).



Figura 18. El software permite visualizar al usuario en que spots de ADN ocurrió una unión perfecta, mediante el cambio indicando esta, una posible mutación

En la figura 18 se muestra un ejemplo de imágenes obtenidas de 12 biosensores hibridados previamente. Es posible observar una coloración diferente entre cada punto, y esto se debe a que en algunos de esos puntos existe una unión perfecta entre ADN's.

## 2.8 APLICACIONES DE LOS MICROARREGLOS

Los microarreglos (Biochips) de ADN, permiten un avance tecnológico en el análisis rápido de genes relacionados con enfermedades del ser humano, como son: dengue, amibiasis, papilomavirus, entre otras.

En la figura 19, se muestra el uso de un microarreglo de ADN, para detectar diferencias en la expresión genética en Células Epiteliales del Seno “Normales Vs. Malignas” [4].

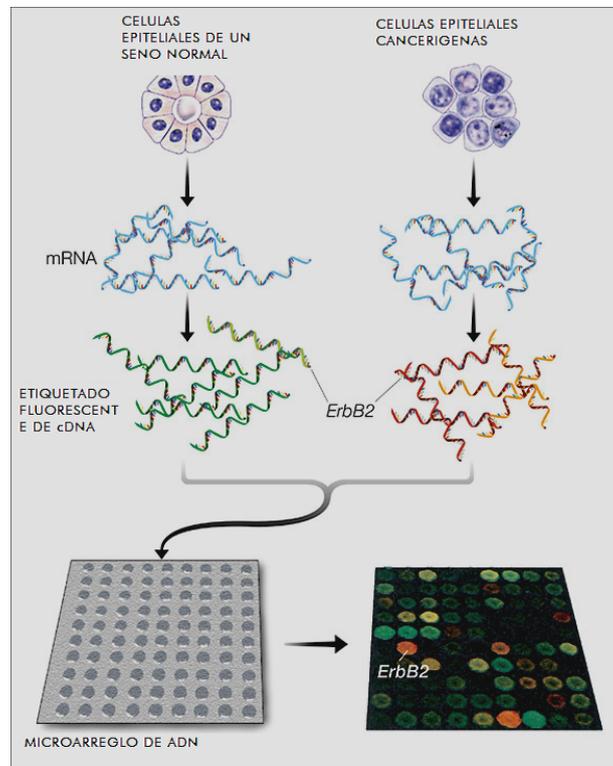


Figura 19. Identificación de células cancerígenas en seno, mediante el uso de microarreglos de ADN.

El RNA mensajero de tejido normal del seno se etiqueta con tinta fluorescente verde, y el RNA mensajero de tejido maligno del seno se etiqueta con tinta roja.

Los ADN's complementarios fluorescentes de las 2 muestras se combinan y se hibridizan al microarreglo de ADN. La abundancia relativa de los diferentes genes en las 2 muestras se refleja por el color de los spots en el microarreglo.

En el ejemplo, el spot del Microarreglo que denota al *ErbB2* flúorese en rojo, indicando que el oncogén *ErbB2* se expresa a niveles anormalmente altos en las células del tumor maligno del seno.

**Resumen.** En este capítulo se dio la introducción al lector, sobre lo que es un biosensor de ADN, para lo cual se explico que es el ADN, ¿qué es el proceso de hibridación, y que importancia tiene para el desarrollo de un biosensor?, se mencionaron las dimensiones físicas, el proceso de fabricación, las técnicas de lectura empleadas, así como las aplicaciones que estos tienen en la lucha contra la prevención de enfermedades que aquejan a la población hoy en día. Se explico porque es necesario el uso de un sistema automatizado (robot) para la fabricación de los biosensores. Debido a que el objetivo principal de esta tesis es la implementación de un sistema automatizado para la fabricación de biosensores de ADN, el capítulo 3 dará una introducción al lector, sobre lo que son estos sistemas (fundamentos), de que partes constan, el uso que estos tiene en la actualidad, costos, entre otras.

## REFERENCIAS DEL CAPITULO II

1. Taylor R.F. and Schultz,J.S. (1996) *Handbook of Chemical and Biological Sensors*. Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
2. Zhai J., Hong,C. and Yang,R. (1997) *Biotechnol. Adv.*, **15**, 43–58.
3. Palecek E., Fojta, M., Tomshick, M. and Wang, J. (1998) *Biosens. Bioelectron.*, **13**, 621-628.
4. Campàs i Homs, Mònica ;Functional oligonucleotide recognition nanomodules for electrochemical DNA biosensors; April 17,2002.
5. Cheng J., Sheldon,E., Wu,L., Gerrue,L., Carrino,J., Heller,M. and O’Connell,J. (1998) *Nat. Biotechnol.*, **16**, 541–545.
6. H. Raether, Surface plasmons oscillations and their applications. *Physics of Thin.*
7. T. Chinowsky, L. Jung and S. Yee, *Sens. Actuators B*, **54** (1999) 89-97.

A blue square with the word "Capítulo" in yellow serif font at the top and a large yellow number "3" in the center.

# INTRODUCCIÓN A SISTEMAS AUTÓMATAS

---

## INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehistóricos, la inquietud del hombre lo ha llevado a desarrollar herramientas tecnológicas que faciliten las tareas desarrolladas en sus labores. Esta inquietud sigue existiendo en nuestros tiempos, sin embargo, día a día, las herramientas se van renovando, conforme la ciencia y la ingeniería expanden su conocimiento. Dos áreas de la ingeniería que han estado muy presentes en la etapa de renovación son: la ingeniería electrónica y la ingeniería mecánica. La ingeniería electrónica ha enfocado su conocimiento en el desarrollo de interfaces electrónicas cada vez más pequeñas, pero a su vez, más poderosas en el procesamiento de datos a velocidades muy altas. La ingeniería mecánica ha enfocado su conocimiento en el desarrollo de aleaciones metálicas, más ligeras pero más resistentes, y que además contienen nuevas propiedades ópticas, eléctricas, químicas, físicas, etc., con el objetivo de que puedan ser aplicadas a área mecánicas, pero también a áreas médicas (prótesis), dentales, automotrices (motores, carrocerías, etc.), químicas (pinturas, instrumentos), etc. Debido a los avances que han presentado ambas ingenierías, ha sido posible que en la actualidad se puedan ver trabajando en conjunto y ya no como dos áreas independientes. El objetivo de esta fusión entre una y otra, se ve reflejado en el desarrollo de sistemas mecánico – electrónicos cuya función sea, la de desarrollar tareas que requieren de una alta precisión y exactitud, pero que a su vez puedan ser aplicados a tareas que en determinado momento pudieran ser perjudiciales para la salud física y mental del ser humano. A estos sistemas se les conoce con el nombre de **“sistemas automátatas ó robots”**.

### 3.1 DEFINICIÓN DE ROBOT

El término "robot" se debe a Karel Capek, quien lo utilizó en 1917 por primera vez, para denominar a unas máquinas construidas por el hombre y dotadas de inteligencia. Deriva de "robotnik" que quiere decir "esclavo de trabajo". Pero según el Instituto Norteamericano de Robótica RIA, robot significa: "Manipulador multifuncional y programable, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas ó dispositivos especiales, mediante movimientos programados y variables que permitan llevar a cabo diversas tareas".

El área que se encarga actualmente del diseño y fabricación de los robots se le llama **robótica**.

#### ANTECEDENTES HISTORICOS

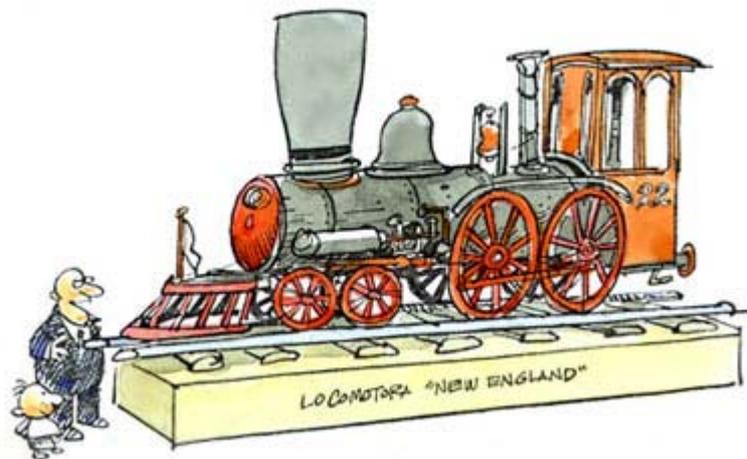
La historia de la tecnología está formada por tres períodos principales: era agrícola, era industrial y era de la información. El desarrollo de los robots se puede ver como lógica e importante parte de la historia.

**Era Agrícola:** En la era agrícola cuya tecnología era muy primitiva, esta estaba formada por herramientas muy simples que, sin embargo eran lo último en tecnología, como consecuencia de ello la mayoría de la gente eran agricultores y todo el trabajo se hacía mediante la fuerza de los hombres y de los animales (Ver figura 20).



*Figura 20. Ilustración de un hombre prehistórico realizando labores de arado de tierra.*

**Era Industrial:** A mediados del siglo XVIII, los molinos de agua, la máquina de vapor y otros transformadores de energía reemplazaron la fuerza humana y animal como fuente principal de energía. Las nuevas máquinas de fabricación impulsaron el crecimiento de la industria y mucha gente pasó a estar empleada en las nuevas fábricas como trabajadores. Los bienes se producían más rápidamente y mejor que antes y la calidad de vida aumentó. Los cambios se sucedieron tan deprisa que a este período se le conoce como "Revolución Industrial" (Ver figura 21).



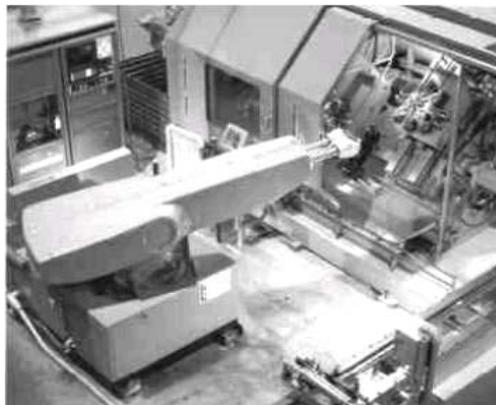
*Figura 21. La era industrial evoluciono las herramientas primitivas para desarrollar tareas muy difíciles y pesadas pero en menor tiempo. En esta figura se muestra una máquina de vapor cuyo objetivo era el de transportar personas y diferentes tipos de carga.*

**Era Informática:** A continuación, en la mitad del siglo XX surgen las industrias basadas en la ciencia, las mejoras tecnológicas en la electrónica hicieron posible el ordenador. Este constituye el desarrollo más importante, el ordenador revolucionó el modo de procesar y comunicar la información. Como resultado la información se ha convertido en un bien más del mercado y esta nueva era se conoce como la era de la información o "post-industrial".

La tecnología de la información tiene un gran impacto en la sociedad, ordenadores, fibra óptica, radio, televisión y satélites de comunicación son sólo ejemplos de dispositivos que tienen un enorme efecto sobre nuestra vida y economía.

Un gran porcentaje de empleos requieren "trabajadores informáticos" y cada vez menos se necesitan "trabajadores de producción". La tecnología de la información ha sido responsable del espectacular crecimiento de la Robótica, y a medida que la era industrial declina se espera que cada vez más trabajo físico sea realizado por robots.

Los primeros robots desarrollados en esta era se aplicaron para desarrollar trabajos industriales pesados, tal es el caso de la industria automotriz. En 1956 Joseph F. Engelberger es director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stanford, Connecticut. Juntos Devol y Engelberger comenzaron a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas, fundando la Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation), e instalando su primera máquina Unimate (1960), en la fábrica de General Motors de Trenton, Nueva Jersey, en una aplicación de fundición por inyección. Devol predijo que el robot industrial "ayudaría al trabajador de las fábricas del mismo modo en que las máquinas de ofimática habían ayudado al oficinista". Se produjo un *boom* de la idea de la fábrica del futuro, aunque en un primer intento el resultado y la viabilidad económica fueron desastrosos (Ver figura 22).



*Figura 22. Primer robot industrial (1956)*

Es esta época, aunque los robots podían realizar tareas que el hombre no podía realizar físicamente, aún era posible ver las muchas limitantes y desventajas que estos poseían, como: elevados costos de fabricación, difícil manipulación, baja precisión, baja exactitud, consumo de potencia muy elevado, elevado costo de mantenimiento, además de que la mayoría de sus movimientos tenían que ser controlados por humanos.

Estas condiciones continuaron hasta el año de 1975, cuando la aplicación del microprocesador, transforma la imagen y las características del robot, hasta entonces grande y costoso.

A partir de 1980, el fuerte impulso en la investigación, por parte de las empresas fabricantes de robots, otros auxiliares y diversos departamentos de Universidades de todo el mundo, sobre la informática aplicada y la experimentación de los sensores, cada vez mas perfeccionados, potencian la configuración del robot inteligente capaz de adaptarse al ambiente y tomar decisiones (autómata) en tiempo real, adecuarlas para cada situación.

### 3.2 TIPOS DE ROBOTS

Dentro de la gama de robots que se fabrican en el mercado, existen clasificaciones que varían de acuerdo a la tarea que estos desempeñan.

- ❖ **Androides:** Una visión ampliamente compartida es que todos los robots son “androides”. Los androides son artilugios que se parecen y actúan como seres humanos. Los robots de hoy en día vienen en todas las formas y tamaños, pero a excepción de los robots que aparecen en las ferias y espectáculos, no se parecen a las personas y por tanto no son androides. Actualmente, los androides reales sólo existen en la imaginación y en películas de ficción.



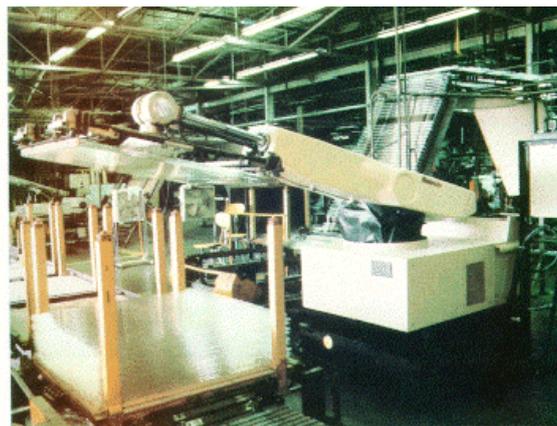
*Figura 23. Fotografía de un prototipo de androide*

- ❖ **Móviles:** Los robots móviles están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes. También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso ó muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y de las investigaciones ó rescates submarinos (Ver figura 24).



*Figura 24. Foto de un prototipo de un robot móvil.*

- ❖ **Industriales:** Los robots de tipo industrial están diseñados para realizar operaciones de carga, soldadura, empaquetado, embotellado, fundición (Ver figura 25).



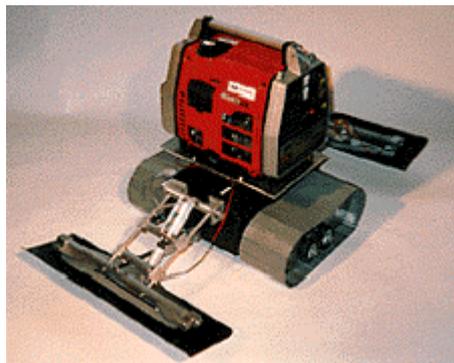
*Figura 25. Foto de un robot industrial utilizado para empaquetamiento de cajas.*

- ❖ **Médicos:** Los robots médicos son utilizados para procedimientos de alta precisión y sensibilidad como prótesis, microcirugías, fabricación de dispositivos biomédicos, entre otros (Ver figura 26).



*Figura 26. A la izquierda se muestra una fotografía de un robot utilizado para prótesis y a la derecha se muestra un robot utilizado para la fabricación de dispositivos biomédicos.*

- ❖ **Domésticos:** En la actualidad ya se fabrican robots cuya función principal es la de desarrollar labores domésticas tales como: aspirar, cortar el césped y barrer (Ver figura 27).



*Figura 27. Fotografía de un prototipo de robot doméstico, utilizado para trapear el piso.*

### 3.3 PARTES FUNDAMENTALES DE UN ROBOT

Las partes fundamentales de un robot son:

- a) Motores
- b) Sensores
- c) Ejes de desplazamiento
- d) Sistema de control electrónico
- e) Articulaciones equipadas con herramientas y con un número limitado de grados de libertad.

#### a) MOTORES

Hay diferentes tipos de motores, que son aplicados para usos diferentes como son:

>**Motores Neumáticos:** En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más utilizados son los **motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales**.

Los motores de pistones axiales tienen un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar ante las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado.

En general y debido a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una buena precisión de posicionamiento. Sin embargo, su sencillez y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada). Por ejemplo, son utilizados en manipuladores sencillos, en apertura y cierre de pinzas (Ver figura 28), o en determinadas articulaciones de algún robot.

Siempre debe tenerse en cuenta que el empleo de un robot con algún tipo de accionamiento neumático deberá disponer de una instalación de aire comprimido, incluyendo: compresor, sistema de distribución (tuberías, electro válvulas), filtros, secadores, etc.

No obstante, estas instalaciones neumáticas son frecuentes y existen en muchas de las fábricas donde se da cierto grado de automatización.

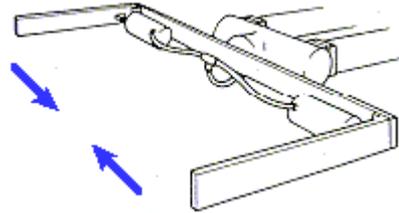


Figura 28. Esquema de una pinza de accionamiento neumático.

>**Motores de Corriente Directa ó DC:** Son los más usados en la actualidad debido a su facilidad de control. En este caso, se utiliza en el propio motor un sensor de posición (Encoder) para poder realizar su control.

Los motores de DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

El inductor, también denominado devanado de excitación, está situado en el estator y crea un campo magnético de dirección fija, denominado excitación.

El inducido, situado en el rotor, hace girar al mismo debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación.

Recibe la corriente del exterior a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito (Ver figura 29).

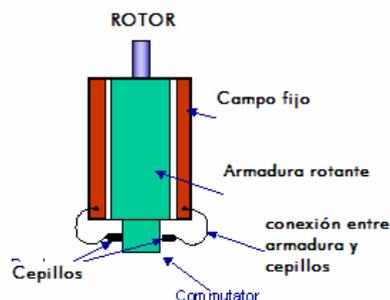


Figura 29. En la figura se muestran las partes de un motor de corriente directa.

Para que se pueda dar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica de forma continua es necesario que los campos magnéticos del estator y del rotor permanezcan estáticos entre sí. Esta transformación es máxima cuando ambos campos se encuentran en cuadratura. El colector de delgas es un conmutador sincronizado con el rotor encargado de que se mantenga el ángulo relativo entre el campo del estator y el creado por las corrientes circulantes. De esta forma se consigue transformar automáticamente, en función de la velocidad de la máquina, la corriente continua que alimenta al motor en corriente alterna de frecuencia variable en el inducido. Este tipo de funcionamiento se conoce con el nombre de autopilotado.

> **Motores paso a paso:** Los motores paso a paso generalmente no han sido considerados dentro de los accionamientos industriales, debido principalmente a que los pares para los que estaban disponibles eran muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas eran grandes. En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales. Existen tres tipos de motores paso a paso:

- de imanes permanentes
- de reluctancia variable
- híbridos.

En los primeros, de **imanes permanentes**, el rotor, que posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator (Ver figura 30).

En los motores de **reluctancia variable**, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas de estator. No contiene, por tanto, imanes permanentes. El estator es similar a un motor DC de escobillas.

La reluctancia de un circuito magnético es el equivalente magnético a la resistencia de un circuito eléctrico. La reluctancia del circuito disminuye cuando el rotor se alinea con el polo del estator. Cuando el rotor está en línea con el estator el hueco entre el rotor y el estator es muy pequeño. En este momento la reluctancia está al mínimo. La inductancia del bobinado también varía cuando el rotor gira. Cuando el rotor está fuera de alineación, la inductancia es muy baja, y la corriente aumentará rápidamente. Cuando el rotor se alinea con el estator, la inductancia será muy grande. Esta es una de las dificultades del manejo de un motor de reluctancia variable.

Los motores **híbridos** combinan el modo de funcionamiento de los dos anteriores.

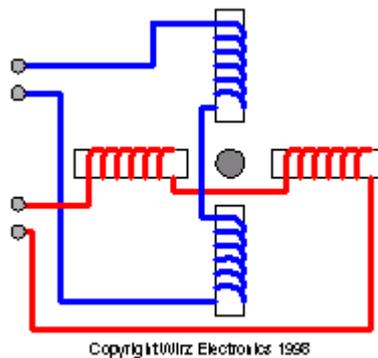


Figura 30. Diagrama eléctrico de un motor a pasos.

A continuación se muestra en la tabla 2, una comparación entre los diferentes tipos de motores.

Características de los distintos tipos de actuadores para robots			
	Neumáticos	Hidráulicos	Eléctricos
Energía	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (50-100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor de pistones axiales	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso Servomotor
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación potencia-peso Autolubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiables Fácil control Sencilla instalación Silenciosos
Desventajas	Dificultad de control continuo Instalación especial (compresor, filtros) Ruidoso	Difícil mantenimiento Instalación especial (filtros, eliminación aire) Frecuentes fugas Caros	Potencia limitada

Tabla 2. Comparación entre los diferentes tipos de motores.

## b) SENSORES

Para conseguir que un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga conocimiento tanto de su propio estado como del estado de su entorno. La información relacionada con su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue con los denominados **sensores internos**, mientras que la que se refiere al estado de su entorno, se adquiere con los **sensores externos**.

>**Sensores internos:** Los sensores internos se catalogan de acuerdo a la función que desempeñan. En la tabla 3 se describen los parámetros que son medidos con este tipo de sensores.

Tipos de sensores internos de robots		
Posición	Analógicos	Potenciómetros <i>Resolver</i> Sincro <i>Inductosyn</i> LVDT
	Digitales	<i>Encoders</i> absolutos <i>Encoders</i> incrementales Regla óptica
Velocidad		Taco-generatriz
Presencia		Inductivo Capacitivo Efecto Hhall Célula Reed Óptico Ultrasonidos Contacto

Tabla 3. Descripción de los parámetros medidos por sensores internos.

- a) **Sensores de posición:** Para el control de posición angular se emplean fundamentalmente los denominados *encoders* (*codificadores angulares de posición*) y *resolvers*. Los potenciómetros dan bajas prestaciones por lo que no se emplean salvo en contadas ocasiones (robots educacionales, ejes de poca importancia).

Los codificadores ópticos o **encoders incrementales** constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma adecuada, y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema del desconocimiento en un momento dado de si se está realizando un giro en un sentido o en el opuesto, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere esté desplazado  $90^\circ$  eléctricos con respecto al generado por la primera franja. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo, es posible obtener una señal adicional que indique cuál es el sentido de giro y que actúe sobre el contador correspondiente indicándole que incremente o reduzca la cuenta que se está realizando. Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión (Ver Figura 31).

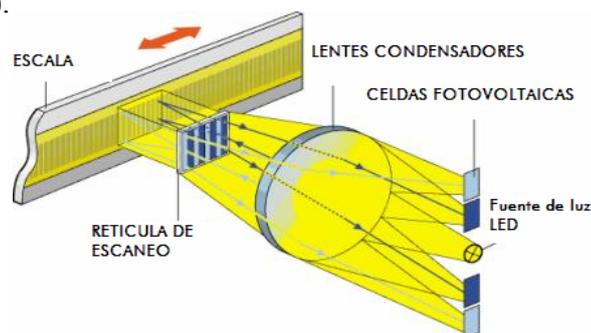


Figura 31. Partes que componen a un codificador óptico.

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco.

Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así la resolución del captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

**Captadores Angulares de Posición:** La otra alternativa en sensores de posición para robots la representan los *resolvers* y los *sincroresolvers*, también llamados sincros. Se trata de sensores analógicos con resolución teóricamente infinita. El funcionamiento de los *resolvers* se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora, generalmente con 400Hz, y por dos bobinas fijas situadas a su alrededor (Ver figura 32).

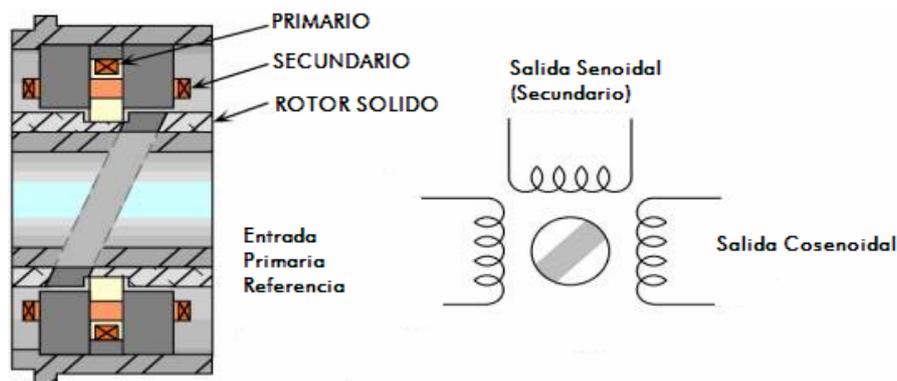


Figura 32. Diagrama eléctrico de un resolver.

El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, consiguiendo que la señal resultante en éstas dependa del seno del ángulo de giro. La bobina móvil excitada con tensión  $V \sin(\omega t)$  y girada un ángulo  $\theta$  induce en las bobinas fijas situadas en cuadratura las siguientes tensiones:

$$\begin{aligned} V_1 &= V \sin(\omega t) \sin \theta \\ V_2 &= V \sin(\omega t) \cos \theta \end{aligned}$$

que es llamada representación del ángulo  $\theta$  en formato sincro. A continuación se muestra una etapa comparativa de los distintos sensores de posición angular (Ver Tabla 4).

Comparación entre diferentes sensores de posición angular				
	Robustez mecánica	Rango dinámico	Resolución	Estabilidad térmica
Encoder	mala	media	buena	buena
Resolver	buena	buena	buena	buena
Potenciómetro	regular	mala	mala	mala

Tabla 4. Comparación entre diferentes sensores de posición angular.

**Sensores de Velocidad:** La captación de la velocidad se hace necesaria para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. La información de la velocidad de movimiento de cada actuador se realimenta normalmente a un bucle de control analógico implementado en el propio accionador del elemento motor. No obstante, en las ocasiones en las que el sistema de control del robot lo exija, la velocidad de giro de cada actuador es llevada hasta la unidad de control del robot.

Normalmente, y puesto que el bucle de control de velocidad es analógico, el sensor usado es una **taco generatriz** que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro de su eje (10 mV por rpm).

Otra posibilidad, usada para el caso de que la unidad de control del robot precise conocer la velocidad de giro de las articulaciones, consiste en derivar la información de posición que ésta posee.

**Sensores de Presencia:** Este tipo de sensor es capaz de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con el objeto. En el segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los diferentes tipos de sensores. En el caso de detección con contacto, se trata siempre de un interruptor, normalmente abierto o normalmente cerrado según interese, actuando mecánicamente a través de un vástago u otro dispositivo. Los detectores de presencia se utilizan en robótica principalmente como auxiliares de los detectores de posición, para indicar los límites de las articulaciones y permitir localizar la posición de referencia de cero de éstos en el caso de que sean incrementales.

Además de esta aplicación, los sensores de presencia se usan como sensores externos, siendo muy sencillos de incorporar al robot por su carácter binario y su costo reducido. Los detectores inductivos permiten detectar la presencia o contar el número de objetos metálicos sin necesidad de contacto. Presentan el inconveniente de distinto comportamiento según del tipo de metal del que se trate. El mismo tipo de aplicación tienen los detectores capacitivos, más voluminosos, aunque en este caso los objetos a detectar no precisan ser metálicos. En cambio presentan problemas de trabajo en condiciones húmedas y con puestas a tierra defectuosa.

>**Sensores externos:** El empleo de mecanismos de detección exteriores permite a un robot interactuar con su ambiente de una manera flexible. Esto contrasta con el funcionamiento preprogramado en el que a un robot se le enseña a realizar tareas repetitivas mediante una serie de funciones preprogramadas. Aunque esto está bastante lejos de la forma más predominante de funcionamiento de los robots industriales actuales, la utilización de la tecnología de detección para proporcionar a las máquinas un mayor grado de inteligencia en relación con su ambiente es, en realidad, un tema activo de investigación y desarrollo en el campo de la robótica.

Un robot que puede ver y sentir es más fácil de entrenar en la ejecución de las tareas complejas mientras que, al mismo tiempo, exige mecanismos de control menos estrictos que las máquinas preprogramadas. Un sistema sensible y susceptible de entrenamiento es también adaptable a una gama mucho más amplia de tareas, con lo que se consigue un grado de universalidad que se traduce, a la larga, en más bajos costos de producción y mantenimiento.

Los sensores de estado externo pueden clasificarse también como sensores de:

- contacto
- no contacto

Como su nombre lo indica, la primera clase de sensores responde al contacto físico, tal como el tacto, deslizamiento y torsión.

Los sensores de no contacto se basan en la respuesta de un detector a las variaciones en la radiación electromagnética o acústica. Los ejemplos más destacados de los sensores de no contacto miden el alcance, la proximidad y las propiedades visuales de un objeto.

Es de interés destacar que la detección de alcance y la visión suelen proporcionar una información de guiado aproximado para un manipulador, mientras que la proximidad y el tacto están asociados con fases terminales de agarre del objeto. Los sensores de fuerza y torsión se utilizan como dispositivos de retroalimentación para controlar la manipulación de un objeto una vez que haya agarrado.

**Sensor de alcance:** Un sensor de alcance mide la distancia desde un punto de referencia (que suele estar en el propio sensor) hasta objetos en el campo de operación del sensor. Los seres humanos estiman la distancia por medio de un procesamiento visual estereográfico. Los sensores de alcance se utilizan para la navegación de robots y para evitar obstáculos, para aplicaciones más detalladas en las que se desean las características de localización y forma en general de objetos en el espacio de trabajo de un robot. Uno de los métodos más sencillos para medir alcance es mediante técnicas de triangulación. Este procedimiento puede explicarse con facilidad haciendo referencia a la figura 33. Un objeto se ilumina por un estrecho haz de luz, que barre toda la superficie. El movimiento de barrido está en el plano definido por la línea desde el objeto hasta el detector y por la línea desde el detector hasta la fuente. Si el detector se enfoca sobre una pequeña parte de la superficie, entonces, cuando el detector vea la mancha luminosa, su distancia a la parte iluminada de la superficie puede calcularse a partir de la geometría de la figura, puesto que se conocen el ángulo de la fuente con la línea de base y la distancia entre la fuente y el detector.

El método anterior proporciona una medida puntual. Si la disposición de fuente-detector se desplaza en un plano fijo (hacia arriba y abajo y en sentido lateral en un plano perpendicular al papel y que contenga la línea de la base en la figura), será posible obtener una serie de puntos cuyas distancias desde el detector serán conocidas.

Estas distancias se transforman con facilidad en coordenadas tridimensionales manteniendo un registro de la localización y orientación del detector a medida que se exploran los objetos.

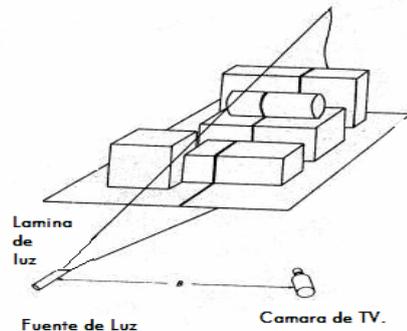


Figura 33. Diagrama del método de triangulación.

**Detector de proximidad:** Los sensores examinados anteriormente proporcionan una estimación de la distancia entre un sensor y un objeto reflectante. Por el contrario, los sensores de proximidad suelen tener una salida binaria que indica la presencia de un objeto dentro de un intervalo de distancia especificado. En condiciones normales, los sensores de proximidad se utilizan en robótica para un trabajo en campo cercano en relación a agarrar o evitar un objeto.

**Sensores Inductivos:** Los sensores basados en un cambio de inductancia debido a la presencia de un objeto metálico están entre los sensores de proximidad industriales de más frecuente uso. El principio de funcionamiento de estos sensores puede observarse en la figura 34.

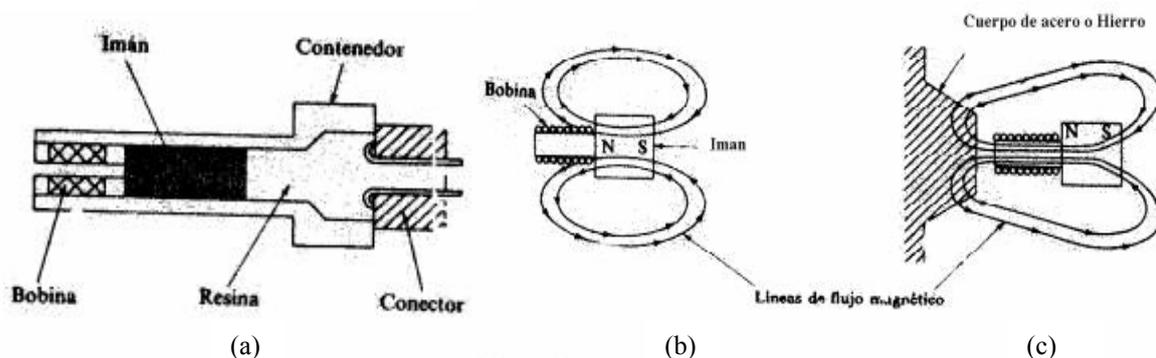


Figura 34. (a) Sensor Inductivo, (b) Forma de líneas de flujo magnético en ausencia de un objeto ferromagnético, (c) Forma de líneas en presencia de un objeto ferromagnético.

La figura 34, muestra un diagrama esquemático de un sensor inductivo, que consiste fundamentalmente en una bobina arrollada, situada junto a un imán permanente empaquetado en un receptáculo simple y robusto.

El efecto de llevar el sensor a la proximidad de un material ferromagnético produce un cambio en la posición de las líneas de flujo del imán permanente según se indica en la figura 34. En condiciones estáticas, no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y, por consiguiente, no se induce ninguna corriente en la bobina.

Sin embargo, cuando un objeto ferromagnético penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud y forma son proporcionales a la velocidad de cambio de flujo.

La forma de onda de la tensión, observada a la salida de la bobina, proporciona un medio efectivo para la detección de proximidad. La tensión medida a través de la bobina varía como una función de la velocidad a la que un material ferromagnético se introduce en el campo del imán. La polaridad de la tensión, fuera del sensor, depende de que el objeto este penetrando en el campo abandonándolo.

Existe una relación entre la amplitud de la tensión y la distancia sensor-objeto. La sensibilidad cae rápidamente al aumentar la distancia, y el sensor sólo es eficaz para fracciones de un milímetro.

**Sensores de Efecto Hall:** El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto Hall sólo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo, cuando se emplean en conjunción con un imán permanente en la configuración tal como la indicada en la figura, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos.

Cuando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto Hall detecta un campo magnético intenso en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano (Ver figura 35).

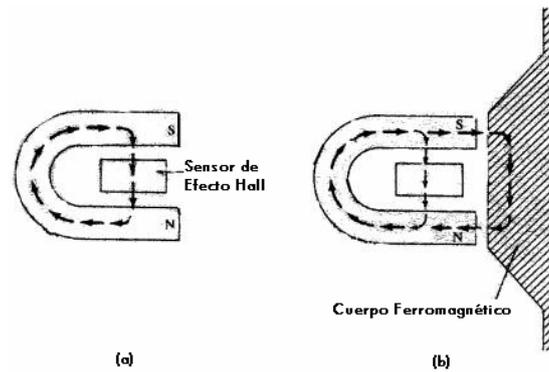


Figura 35. Diagrama eléctrico de un sensor de Efecto Hall.

Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material. Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético. Esta fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección de movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo. Es decir, la fuerza de Lorentz viene dada por  $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , en donde  $q$  es la carga,  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidad,  $\mathbf{B}$  es el vector del campo magnético y  $\times$  indica el producto vectorial. Al llevar un material ferromagnético cerca del dispositivo de imán semiconductor disminuirá la intensidad del campo magnético, con la consiguiente reducción de la fuerza de Lorentz y, finalmente, la tensión a través del semiconductor. Esta caída en la tensión es la clave para detectar la proximidad con sensores de efecto Hall. Las decisiones binarias con respecto a la presencia de un objeto se realizan estableciendo un umbral de la tensión fuera del sensor.

**Sensor Capacitivo:** A diferencia con los sensores inductivos y de efecto Hall que detectan solamente materiales ferromagnéticos, los sensores capacitivos son potencialmente capaces (con diversos grados de sensibilidad) de detectar todos los materiales sólidos y líquidos. Como su nombre indica, estos sensores están basados en la detección de un cambio en la capacidad inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor (Ver figura 36).

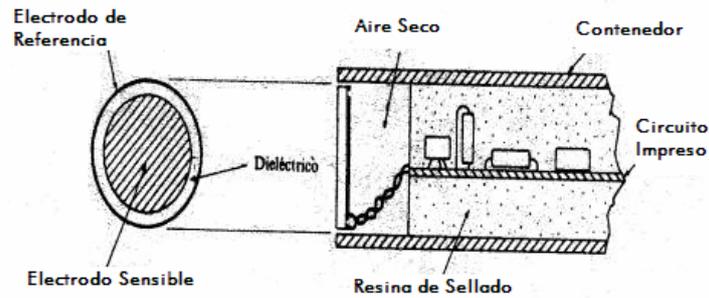


Figura 36. Diagrama eléctrico de un sensor capacitivo.

El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia. Estos electrodos pueden ser, por ejemplo, un disco y un anillo metálicos separados por un material dieléctrico. Una cavidad de aire seco se suele colocar detrás del elemento capacitivo para proporcionar aislamiento. El resto del sensor está constituido por circuitos electrónicos que pueden incluirse como una parte integral de la unidad, en cuyo caso suelen estar embebidos en una resina para proporcionar soporte mecánico y sellado. Hay varios métodos electrónicos para detectar la proximidad basada en cambios de la capacidad. Uno de los más simples incluye el condensador como parte de un circuito oscilador diseñado de modo que la oscilación se inicie solamente cuando la capacidad del sensor sea superior a un valor umbral preestablecido. La iniciación de la oscilación se traduce luego en una tensión de salida, que indica la presencia de un objeto. Este método proporciona una salida binaria, cuya sensibilidad de disparo dependerá del valor umbral.

La capacidad varía como una función de la distancia para un sensor de proximidad basado en los conceptos anteriores. Es de interés destacar que la sensibilidad disminuye mucho cuando la distancia es superior a unos pocos milímetros y que la forma de la curva de respuesta depende del material objeto de detección. En condiciones normales, estos sensores son accionados en un modo binario, de modo que un cambio en la capacidad mayor que en un umbral preestablecido  $T$  indica la presencia de un objeto, mientras que los cambios por debajo del umbral indican la ausencia de un objeto con respecto a los límites de detección establecidos por el valor de  $T$ .

**Sensores ultrasónicos:** La respuesta de todos los sensores de proximidad hasta ahora examinados depende, en gran medida, del material objeto de la detección. Esta dependencia puede reducirse mucho utilizando sensores ultrasónicos. En la estructura de un transductor ultrasónico típico utilizado para detección de proximidad el elemento básico es un transductor electroacústico, frecuentemente del tipo cerámico piezoeléctrico. La capa de resina protege al transductor contra la humedad, polvo y otros factores ambientales y también actúa como un adaptador de impedancia acústica. Puesto que el mismo transductor se suele utilizar para la transmisión y la recepción, un amortiguamiento rápido de la energía acústica es necesario para detectar objetos a pequeña distancia. Esta operación se realiza proporcionando absorbedores acústicos y desacoplando el transductor de su receptáculo. Este último está diseñado de modo que produzca un haz acústico estrecho para una eficaz transferencia de energía y una mejor direccionalidad de la señal.

**Sensores de contacto:** Estos sensores se utilizan en robótica para obtener información asociada con el contacto entre una mano manipuladora y objetos en el espacio de trabajo. Cualquier información puede utilizarse, por ejemplo, para la localización y el reconocimiento del objeto, así como para controlar la fuerza ejercida por un manipulador sobre un objeto dado. Los sensores de contacto pueden subdividirse en dos categorías principales: binarios y analógicos.

Los **sensores de tipo binario** son dispositivos de contacto tales como micro interruptores. En la disposición más simple, un conmutador está situado en la superficie interior de cada dedo de una mano de manipulación. Este tipo de detección es de utilidad para determinar si una pieza está presente entre los dedos. Desplazando la mano sobre un objeto y estableciendo secuencialmente contacto con la superficie, también es posible centrar la mano sobre el objeto para su agarre y manipulación.

Sensores de contacto binarios múltiples pueden emplearse, en la superficie interior de cada dedo, para proporcionar información táctil.

Además, suelen estar montados en las superficies exteriores de una mano de manipulación para proporcionar señales de control de utilidad para guiar la mano a través de todo el espacio de trabajo. Este último modo de detección por contacto es análogo al que los seres humanos sienten cuando se desplazan a través de un recinto completamente oscuro (Ver figura 37).

Los **sensores analógicos** son dispositivos cuya salida es proporcional a una fuerza local. El más simple de estos dispositivos está constituido por una varilla accionada por resorte que esta mecánicamente enlazada con un eje giratorio, de tal manera que el desplazamiento de la varilla debido a una fuerza lateral da lugar a una rotación proporcional del eje. La rotación se mide luego, de manera continua, utilizando un potenciómetro, o de forma digital, con el uso de una rueda de código. El crecimiento de la constante del resorte proporciona la fuerza que corresponde a un desplazamiento dado.

En los últimos años se ha dedicado un esfuerzo considerable al desarrollo de conjuntos de detección táctil, capaces de proporcionar una información de contacto sobre un área más amplia que la proporcionada por un sensor único. El empleo de estos dispositivos se ilustra en la figura, que muestra una mano de robot en la que la superficie interior de cada dedo ha sido recubierta con un arreglo táctil de detección.

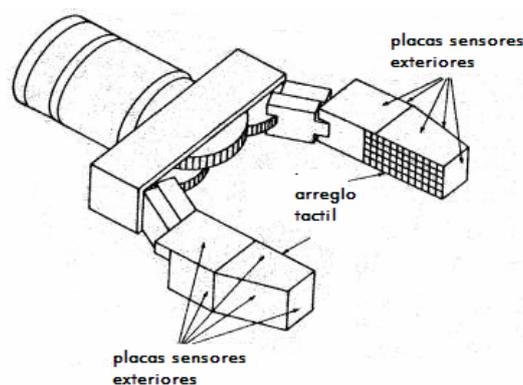


Figura 37. Diagrama mecánico de una pinza con sensores binarios.

**Sensor de presión:** Se puede utilizar un sensor de presión para la retroalimentación mecánica de una mano, para controlar la fuerza de agarre, indicación sensible de cuando la mano sujeta un objeto. Un sensor óptico de presión consiste en una superficie dividida en células por particiones opacas. Una fibra óptica trae luz a cada célula; la luz es emitida por un diodo u otra fuente. Otra fibra lleva luz de la célula a un sensor; por ejemplo, un fotodiodo o fototransistor. Las células son cubiertas por un material elástico con una superficie interior reflectante.

El resto de la célula es de un material no reflectante. El cambio en la reflexión interior de luz es detectado por el sensor y se produce una señal que informa al operador de contacto. Cuanto mayor sea la presión, mayor es el cambio en la reflexión. Así, puede "sentirse" la presión utilizando circuitería analógica. Si se desea únicamente una indicación de contacto, un sensor de umbral puede ser incluido en la electrónica.

Todos los sensores de contacto mencionados hasta ahora se refieren a medidas de fuerzas normales a la superficie del sensor, aunque la medida del movimiento tangencial para determinar el deslizamiento es otro aspecto importante de la detección de contacto.

**Sensores de fuerza y torsión:** Los sensores de fuerza y de torsión se utilizan principalmente para medir las fuerzas de reacción desarrolladas en la superficie de separación entre conjuntos mecánicos. Los métodos principales para realizar esta operación son los de detección de articulación y muñeca. Un sensor de articulación mide los componentes cartesianos de la fuerza y de la torsión que actúan sobre una articulación de robot y la suma de forma vectorial. Para una articulación impulsada por un motor de corriente continua, la detección se realiza simplemente midiendo la corriente del inducido.

Los **sensores de muñeca** están montados entre la extremidad de un brazo del robot y el actuador final. Están constituidos por galgas de deformaciones que miden la desviación de la estructura mecánica debida a fuerzas exteriores.

Los sensores de muñeca son pequeños, sensibles, de poco peso (aproximadamente 12 onzas) y de un diseño relativamente compacto, del orden de 10 cm de diámetro total y de 3cm de espesor. Para poder reducir la histéresis y aumentar la exactitud en la medida, el *hardware* se suele construir a partir de una pieza mecánica maciza, que suele ser de aluminio.

### c) EJES DE DESPLAZAMIENTO

Los ejes de desplazamiento de un robot se refieren a los movimientos de traslación que sus partes pueden llevar a cabo. Los ejes de traslación más utilizados en un sistema automatizado son: eje X, eje Y y eje Z (Ver figura 38).

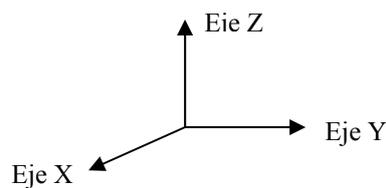


Figura 38. Coordenadas de desplazamiento

### d) SISTEMA DE CONTROL ELECTRONICO

Como su nombre indica, es el que regula cada uno de los movimientos del manipulador, las acciones, cálculos y procesado de la información. El controlador recibe y envía señales a otras máquinas-herramientas (por medio de señales de entrada/salida) y almacena programas.

Existen varios grados de control que son función del tipo de parámetros que se regulan, lo que da lugar a los siguientes tipos de controladores:

- **de posición:** el controlador interviene únicamente en el control de la posición del elemento terminal;

- **cinemático:** en este caso el control se realiza sobre la posición y la velocidad;
- **dinámico:** además de regular la velocidad y la posición, controla las propiedades dinámicas del manipulador y de los elementos asociados a él;
- **adaptativo:** engloba todas las regulaciones anteriores y, además, se ocupa de controlar la variación de las características del manipulador al variar la posición

Otra clasificación de control es la que distingue entre control en bucle abierto y control en bucle cerrado.

El control en bucle abierto da lugar a muchos errores, y aunque es más simple y económico que el control en bucle cerrado, no se admite en aplicaciones industriales en las que la exactitud es una cualidad imprescindible. La inmensa mayoría de los robots que hoy día se utilizan con fines industriales se controlan mediante un proceso en bucle cerrado, es decir, mediante un bucle de **realimentación**. Este control se lleva a cabo con el uso de un sensor de la posición real del elemento terminal del manipulador. La información recibida desde el sensor se compara con el valor inicial deseado y se actúa en función del error obtenido de forma tal que la posición real del brazo coincida con la que se había establecido inicialmente (Ver figura 39).

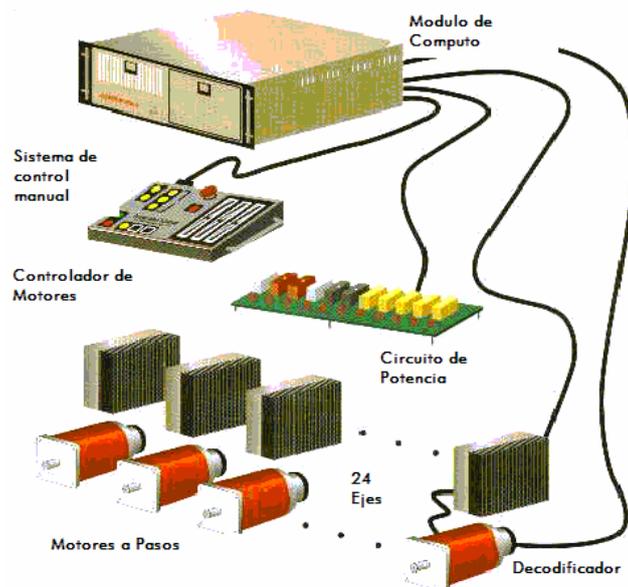


Figura 39. Ejemplo de un sistema de control electrónico

### e) ARTICULACIONES DE UN ROBOT

Como ya se menciona, un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sensores, elementos terminales y controlador. Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de estos (máquinas herramientas y otras muchas máquinas emplean tecnologías semejantes), las altas prestaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas.

La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc (Ver figura 40).

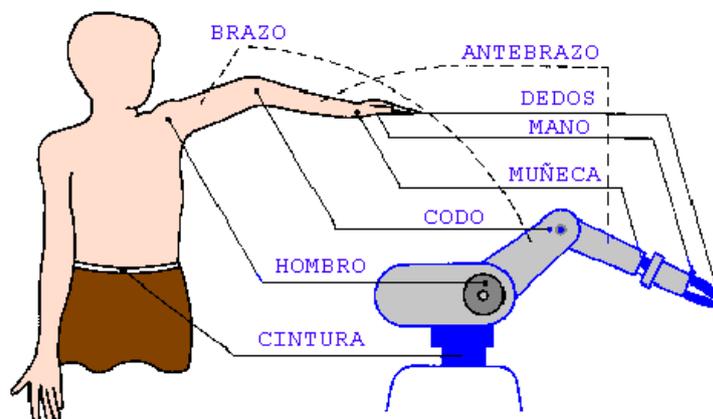


Figura 40. Relación entre las articulaciones de un ser humano y las articulaciones de un robot.

A los movimientos individuales de cada articulación del robot se les denomina “**grados de libertad**”. Las articulaciones que un robot puede tener, se clasifican de la siguiente manera:

a) Lineal (L): Movimiento deslizante ó de traslación (Ver figura 41).

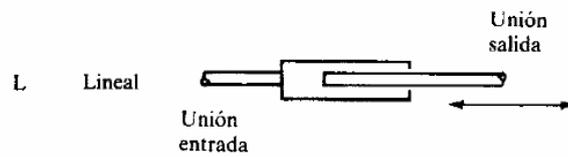


Figura 41. Esquema de traslación lineal.

b) Giratorias:

> Rotacional: El eje de rotación es perpendicular a los ejes de las dos uniones (Ver figura 42).

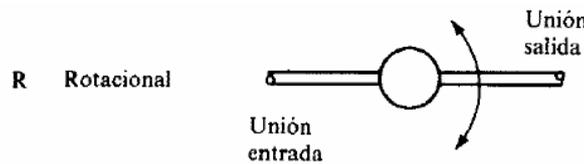


Figura 42. Esquema de traslación rotacional.

> Torsión: El eje de rotación es paralelo a los ejes de las dos uniones (Ver figura 43).

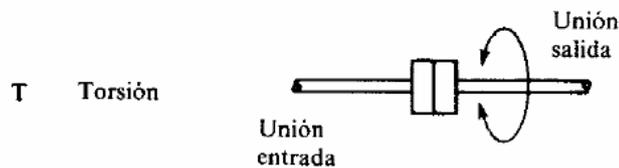


Figura 43. Esquema de traslación rotacional.

> Revolución: La unión de entrada es paralela al eje de rotación y la de salida es perpendicular a dicho eje (Ver figura 44).

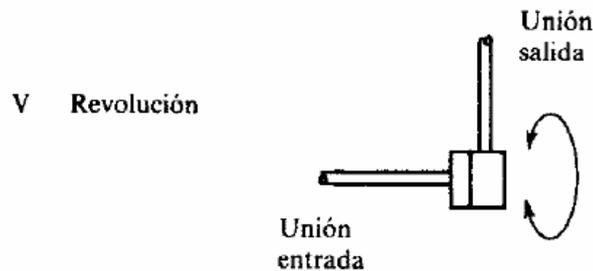


Figura 44. Esquema de traslación por revolución

### 3.4 CONFIGURACIONES MORFOLOGICAS DE UN ROBOT

La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio y que se citan a continuación: cartesianas, cilíndricas, esféricas, angulares. Así, el **brazo del manipulador** puede presentar cuatro configuraciones clásicas:

- **cartesiana**
- **cilíndrica**
- **esférica**
- **de brazo articulado,**

Y una no clásica:

- **SCARA** (*Selective Compliance Assembly Robot Arm* ó *Armadura de Robot por ensamblado selectivo*).

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del brazo manipulador.

**Cartesiana / Rectilínea:** El posicionando se hace en el espacio de trabajo con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z.

Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales. Interpolación, en este caso, significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro. A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación (Ver figura 45).



Figura 45. Representación de un robot configurado cartesianamente.

**Cilíndrica:** El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad.

Este robot está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación. La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional (Ver figura 46).

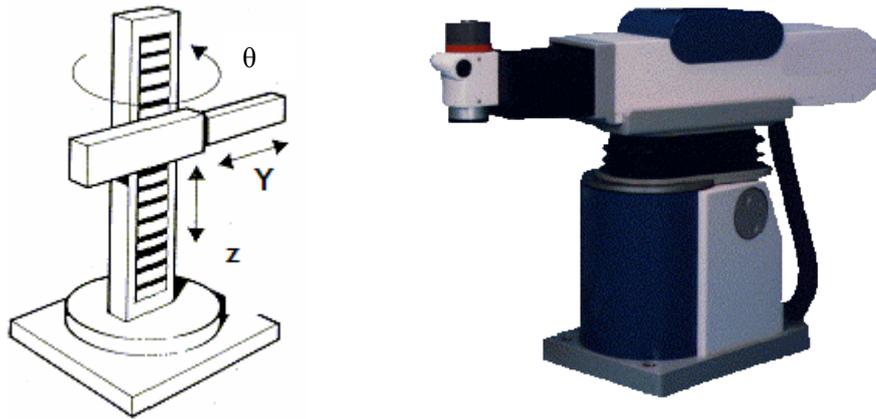


Figura 46. Representación de un robot configurado cilíndricamente.

**Esférica / Polar:** Dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción (Ver figura 47).

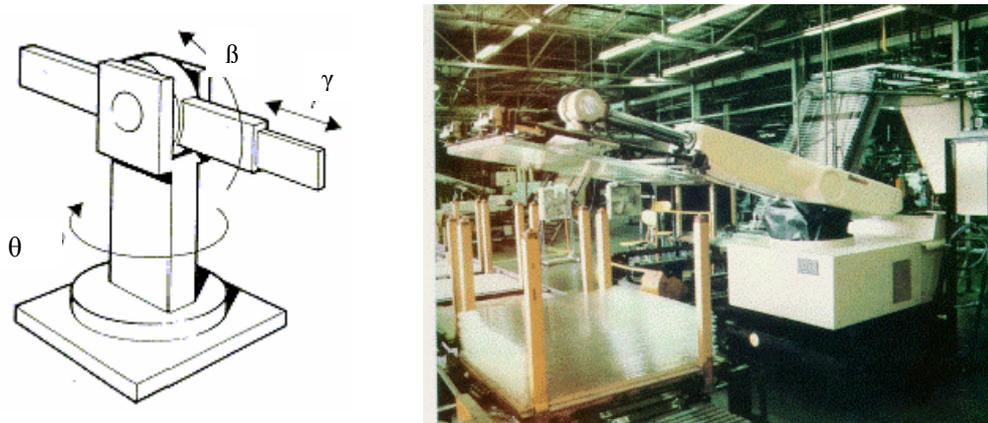


Figura 47. Representación de un robot configurado esféricamente.

**Brazo articulado / Articulación esférica / Articulación coordinada / Rotación / Angular:** El robot usa 3 juntas de rotación para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular (Ver figura 48).

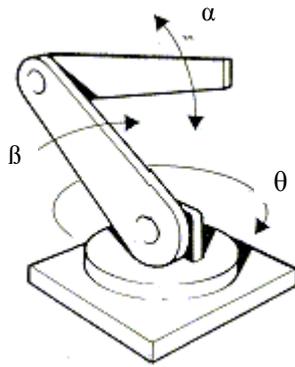


Figura 48. Representación de un robot con configuración: esférica, esférica, rotación angular.

**SCARA** - Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración **SCARA** también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación) (Ver figura 49).

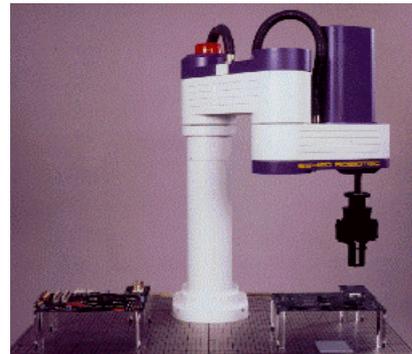
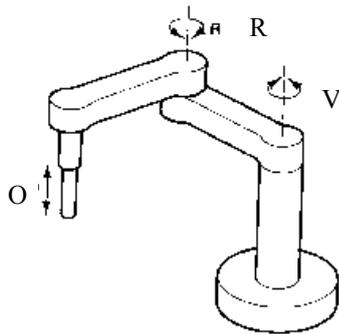


Figura 49. Representación de un robot con configuración SCARA.

Otro aspecto importante que se debe de tomar en cuenta para la configuración del robot es su **volumen de trabajo**. El volumen de trabajo se define como el espacio dentro del cual el robot debe desempeñar sus funciones, sin que un objeto cercano le impida llevar sus tareas a cabo (Ver figura 50). El volumen se determina por:

- Configuración física.
- Tamaño de los componentes del cuerpo, brazo y muñeca.
- Los límites de los movimientos de las articulaciones.

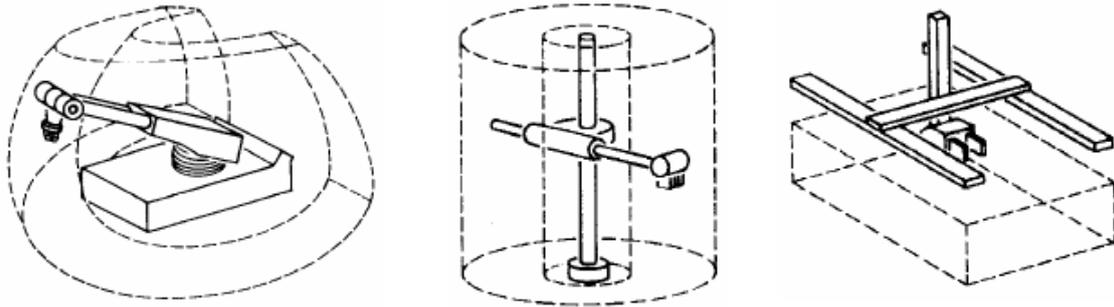


Figura 50. Representación esquemática del volumen de trabajo de un robot.

### 3.5 RENDIMIENTO DINAMICO

El rendimiento dinámico se compone de tres características esenciales:

- **Velocidad de respuesta:** La capacidad de un robot para desplazarse a la siguiente posición en un breve espacio de tiempo.
- **Estabilidad:** La estabilidad es una medida de las oscilaciones durante el movimiento del brazo del robot.

En la figura 51, se muestra la relación que existe entre la velocidad de respuesta y la estabilidad.

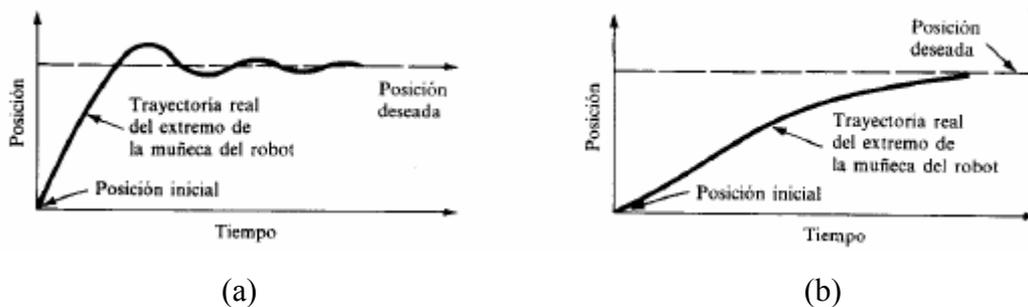


Figura 51. (a) la velocidad de respuesta es mayor, pero hay muy poca estabilidad, (b) la estabilidad es buena, pero la velocidad de respuesta es baja.

### 3.6 PRECISIÓN DE MOVIMIENTO

Se define como el más pequeño incremento de movimiento en el que el robot puede dividir su volumen de trabajo. Depende de:

**Resolución espacial:** La resolución del sistema de control de posición. Las inexactitudes mecánicas del robot (holguras, flexiones, distensiones de transmisión, etc.) que degradan la resolución del sistema de control.

**Exactitud:** La exactitud global es la capacidad para situar el extremo de la muñeca en el punto de destino deseado dentro del volumen de trabajo. Si se ignoran las inexactitudes mecánicas se puede definir como la mitad de la resolución del sistema de control. La exactitud real varía dentro del volumen de trabajo (brazo extendido mayores errores), por lo que se establecen “mapas de error”. La carga también influye en la exactitud, pues provoca mayores desviaciones de las uniones mecánicas.

**Repetitibilidad:** Es la capacidad del robot para desplazarse en un punto del espacio programado con anterioridad. La repetitibilidad y la exactitud son aspectos diferentes de la precisión. La exactitud está relacionada con la capacidad para programar un punto de destino determinado. La repetitibilidad se refiere a la capacidad del robot para volver al punto programado cuando se le ordena. El error de repetitibilidad es una variable aleatoria y constituye una distribución estadística (Ver figura 52).

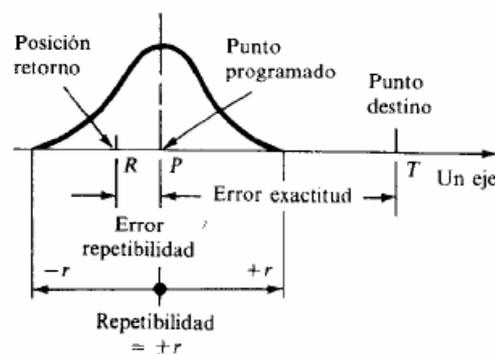


Figura 52. Gráfica que muestra la capacidad de repetitibilidad.

**Resumen.** En este capítulo se dio la introducción al lector, sobre lo que son los robots, su clasificación, sus antecedentes históricos, las partes que conforman a un robot como son: sensores, actuadores, interfaces de control electrónicas, piezas mecánicas, ejes de desplazamiento, etc. Se establecieron las configuraciones morfológicas que puede adoptar un robot. En el capítulo 4, se explicarán las etapas del desarrollo del sistema automático desarrollado en esta tesis, tanto del Hardware como del Software, retomando los conceptos aprendidos en este capítulo

### REFERENCIAS DEL CAPITULO III

*Introduction to Robotics. Mechanics & Control*, J. Craig, Addison-Wesley.

*Robot Builder's Bonanza: 99 Inexpensive Robotics Projects*, Gordon McComb, McGraw-Hill.

Robótica. Universidad de Guadalajara. México.  
[proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/](http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/)

Curso de robótica móvil. Aperobot.  
[usuarios.bitmailer.com/aperobot/indice\\_tutorial.html](http://usuarios.bitmailer.com/aperobot/indice_tutorial.html)

*Control de Robots y sistemas sensoriales*. ISA. Universitat Miguel Hernández:  
[3w.umh.es/](http://3w.umh.es/)

Robótica. Universidad Rey Juan Carlos.  
[gsyc.escet.urjc.es/docencia/asignaturas/robotica/](http://gsyc.escet.urjc.es/docencia/asignaturas/robotica/)

Robotics course. Universitat Jaume I. [www.stalker.es/personal/robotica/main.html](http://www.stalker.es/personal/robotica/main.html)

Robótica Industrial. [www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html](http://www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html)

Tutorial sobre robótica. [www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm](http://www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm)

LEGO- Robotics Network. [www.lego.com/robotics/robotic-intro/default.asp](http://www.lego.com/robotics/robotic-intro/default.asp)

Sitio Web de Fischertechnik. <http://www.fischertechnik.com/>

TodoRobot. <http://www.todorobot.com.ar/>

Creaturoides. <http://www.creaturoides.com/>

All about robots. [www.occdsb.on.ca/~proj4632/learnmore.htm](http://www.occdsb.on.ca/~proj4632/learnmore.htm)

A blue square with the word 'Capítulo' in yellow serif font at the top and a large yellow number '4' in the center.

## DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE DEL ROBOT.

---

### INTRODUCCIÓN

En el capítulo III se mencionó que para construir un robot se requieren de ciertos componentes tales como: circuitos electrónicos, sensores, piezas mecánicas y motores entre otros. A este grupo de componentes se le llama **Hardware**. Otro factor que es muy importante contemplar en el desarrollo de un robot es el control de los movimientos del robot, para lo cual, es necesario implementar un programa que permita sincronizar todo el hardware, pero que a su vez, permita a un operador ó usuario interactuar remotamente con las tareas que este desarrolle. Al programa que permite la interacción usuario-PC se le llama **Software**.

### 4.1 DISEÑO DE HARDWARE

Se planteo un diseño adecuado específicamente para la fabricación de microarreglos, para lo cual se desarrollo un diagrama mecánico que cumpliera con ciertas características de funcionamiento (Ver figura 53).

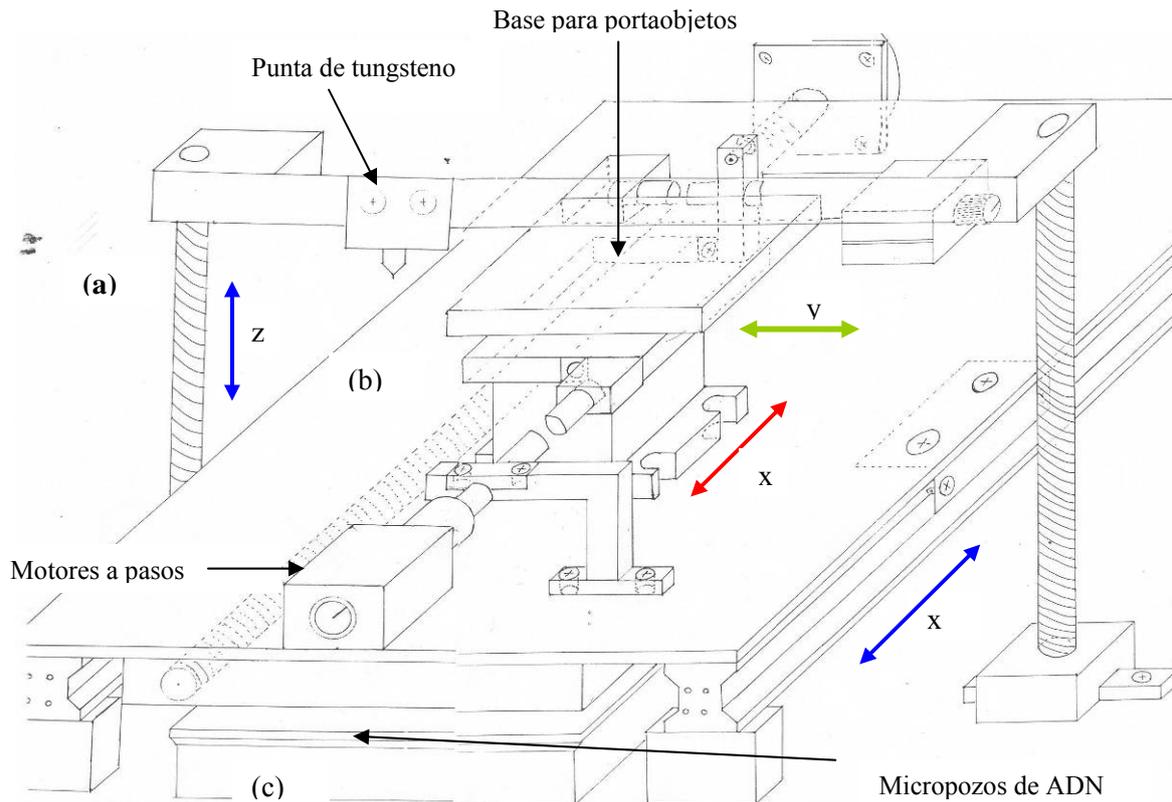


Figura 53. Diagrama mecánico del robot..(a) eje z: desplaza una punta de tungsteno;(b) plataforma que sostiene un portaobjetos de vidrio, se desplaza en los ejes x,y;(c) este eje se desplaza en x y sostiene una plataforma de micropozos con solución de ADN.

## 4.2 DESCRIPCION DE LAS PARTES DEL ROBOT.

El robot se compone de 2 ejes X, 1 eje Y y un eje Z. La configuración morfológica utilizada es cartesiana/rectilínea. De la figura 53, se describe lo siguiente:

- (a) Se implementó un eje Z, compuesto por dos tornillos embalados fabricados por la compañía “BARMEX SA de CV”, que permiten desplazar una punta metálica de tungsteno sujeta a estos, y que es utilizada para tomar una cantidad de solución de ADN de los micropozos (Ver figura 54).



Figura 54. A la izquierda se muestran los tornillos embalados y a la derecha se muestra la punta de tungsteno utilizada.

Para poder desplazar la punta de abajo hacia arriba y viceversa, se implementó un motor a pasos fabricado por la compañía “Crouzet” modelo 82940043 cuyas características técnicas se mencionan a continuación (Ver figura 55):

- Potencia: 12.5W
- Pasos: 7.5°
- Voltaje de alimentación: 12 Vdc

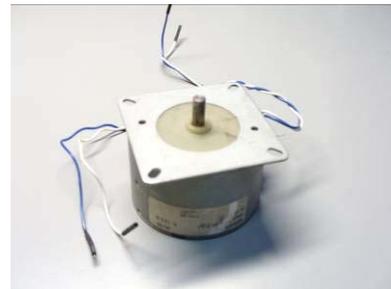


Figura 55. Características y fotografía del motor utilizado para desplazar el eje Z

Para poder incorporar el motor a los tornillos embalados, se utilizó un buje fabricado por la compañía “BARMEX SA de CV”, además se implementaron dos poleas conectadas por una banda de tiempo, con el objetivo de que un solo motor pueda mover los dos tornillos al mismo tiempo, tanto en dirección ascendente como descendente. Este punto ayuda a dar la sincronía adecuada que necesita la punta para evitar el oscilamiento involuntario (Ver figura 56).

Buje de  
sujeción



Figura 56. A la derecha se muestra el buje sujetado a la flecha del motor; a la derecha se muestra una de las dos poleas dentadas.

- (b) Se implemento una plataforma milimétrica manual para poder desplazar al portaobjetos en dos direcciones (x,y), con el objetivo de poder generar los arreglos matriciales y geométricos con los spots (puntos) de ADN y de esta manera generar el microarreglo adecuado (Ver figura 57).

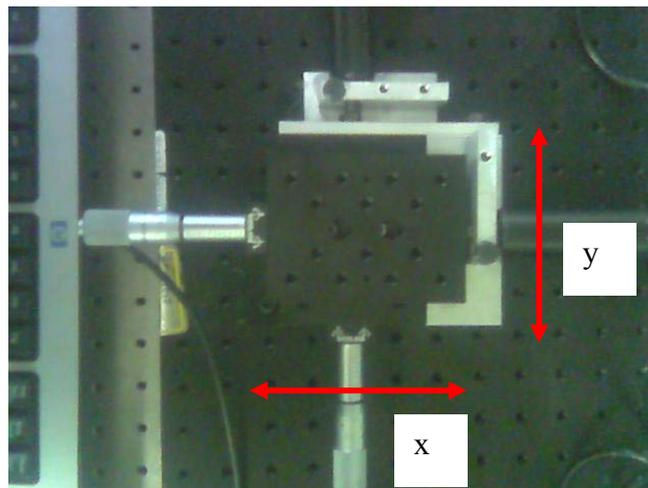


Figura 57. Fotografía de la plataforma utilizada para generar los arreglos matriciales

Debido a que la plataforma milimétrica se desplazaba manualmente, fue necesario realizar una modificación mecánica, que permitiera realizar los desplazamientos de forma automática, utilizando motores a pasos. Sin embargo, tales motores tenían que cumplir con especificaciones especiales como el desplazamiento mínimo que podrían ejecutar, ya que para la fabricación de microarreglos, se requiere que las distancias entre spots de ADN sean lo más pequeñas posibles, mínimo del orden de micras, pero si es mucho menor es mejor, tal como se menciona en el capítulo II.

Para llevar a cabo este objetivo, se utilizó un sistema de control fabricado por la compañía “Melles Griot”, el modelo es el 11NSC101. Este sistema cuenta con dos motores a pasos. Por cada revolución hay 400 pasos. Este sistema puede desplazar las flechas de los motores en unidades de cm, mm,  $\mu\text{m}$  y de acuerdo al fabricante es posible desplazar las flechas hasta de 10 nm en 10 nm. Sin embargo, las unidades que se utilizaron por el momento son: cm, mm y  $\mu\text{m}$  (Ver figura 58).



Figura 58. A la izquierda se muestra el sistema de control electrónico 11NSC101 y a la derecha se muestran los motores a pasos utilizados para realizar los movimientos de la plataforma.

En la figura 59, se muestra la adaptación de los motores de precisión a la plataforma milimétrica.

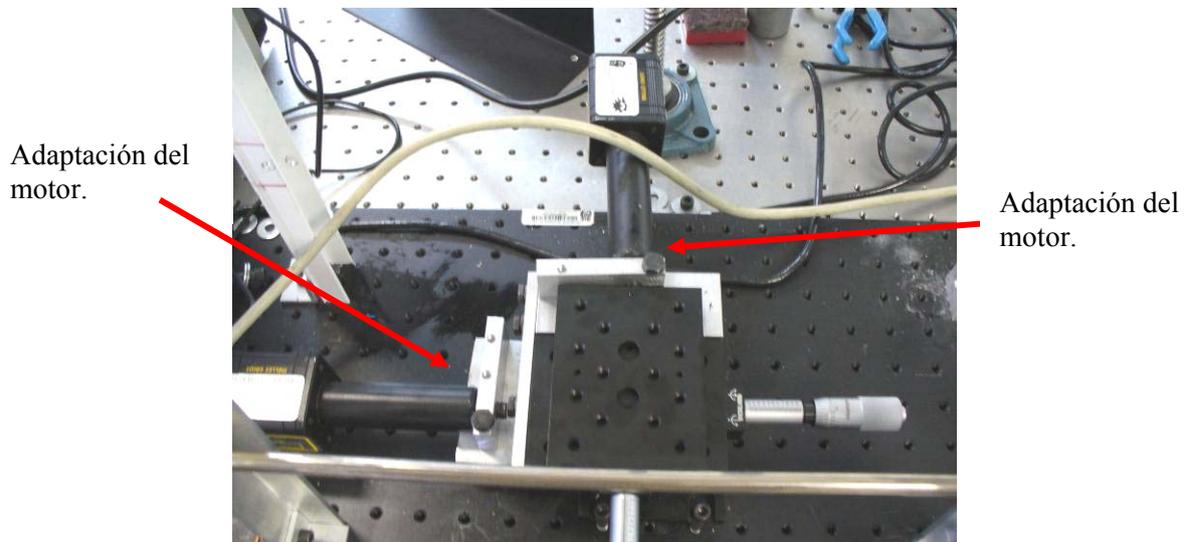


Figura 59. Adaptación de los motores de precisión a la plataforma milimétrica.

(c) Se implemento una plataforma que traslada la bandeja de los micropozos en un segundo eje X, utilizada para que la punta metálica, pueda recoger una porción de ADN por el proceso de capilaridad. Este segundo eje, fue pensado, debido a que la punta metálica no tiene desplazamiento alguno, esto quiere decir que se encuentra fija al eje Z (Ver figura 60).



Figura 60. Fotografía de la bandeja de los micropozos que contienen ADN.

Para minimizar los costos de fabricación en esta etapa, se implemento parte del sistema de una impresora. Las partes utilizadas fueron: el riel de desplazamiento de los cartuchos de tinta, el sensor óptico de posicionamiento de los cartuchos, el motor de desplazamiento de los cartuchos, la banda y las poleas (Ver figura 61).



(a) Motor de corriente directa

(b) Banda de tiempo con polea

(c) Motor con banda de tiempo.

Figura 61. Partes utilizadas de la impresora, implementadas para desarrollar el segundo eje de desplazamiento x, que permite mover en 2 sentidos la bandeja de los micropozos.

La integración de los componentes de la impresora se realizó de siguiente manera (Ver figura 57).

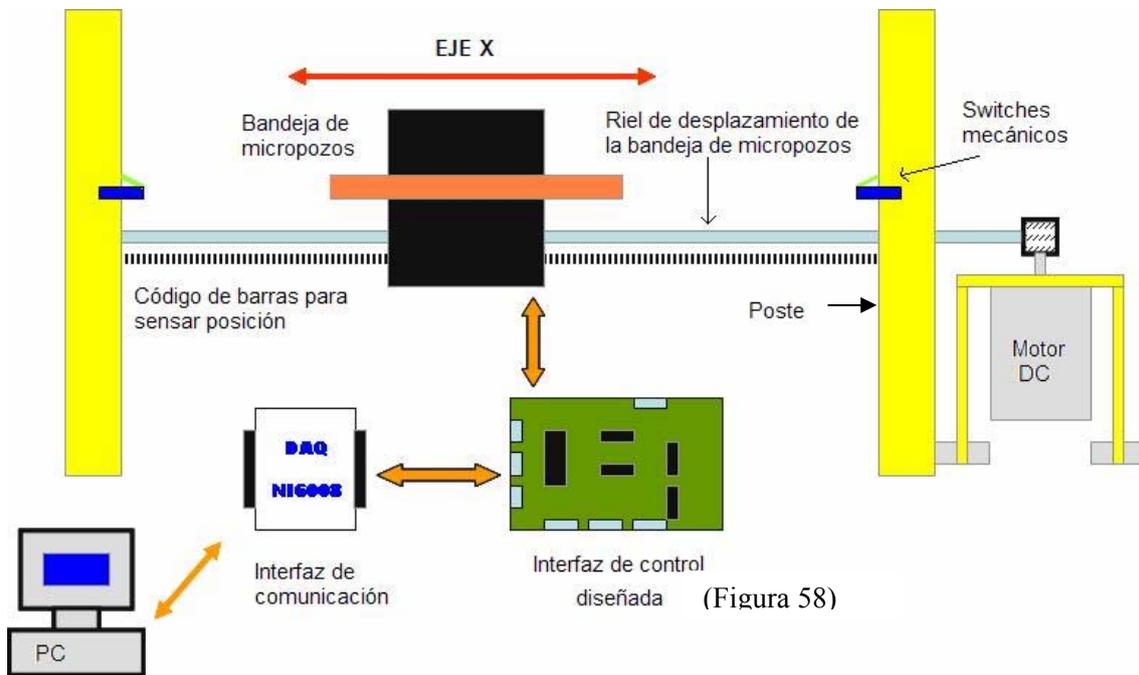


Figura 57. Diagrama que muestra la adaptación de los componentes de una impresora como eje de desplazamiento de la bandeja de micropozos.

Para poder controlar esta plataforma, se diseñó un circuito, que permite controlar:

- La velocidad del motor de DC (corriente directa).
- El sentido de giro del motor (sentido horario ó sentido antihorario)
- El encendido y apagado general del robot.
- Los pulsos de salida entregado por los sensores tanto ópticos como mecánicos.
- Conversión de señales digitales en señales de potencia.

El circuito diseñado se muestra en la figura 58 y el diagrama eléctrico se muestra en la figura 59 (página 86).

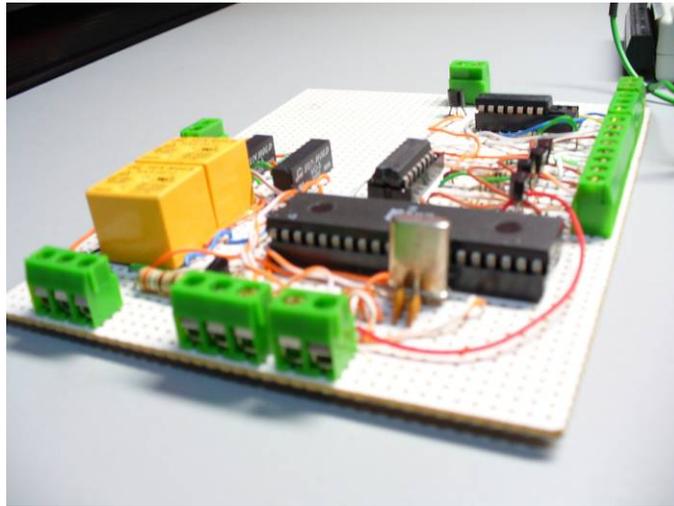


Figura 58. Fotografía del circuito diseñado para controlar el eje de desplazamiento de la bandeja de los micropozos de ADN.

El circuito contiene los siguientes componentes:

a) **Un Microcontrolador:** El microcontrolador se encarga de generar y sincronizar los pulsos adecuados para controlar la velocidad y el sentido de giro del motor de corriente directa, además interpreta las señales provenientes de los sensores para determinar la posición de la bandeja de los micropozos, ayudando así a que la punta de tungsteno quede centrada con el agujero en cada micropozo. También controla el movimiento del eje z donde se encuentra sujeta la punta de tungsteno (Ver figura 60).

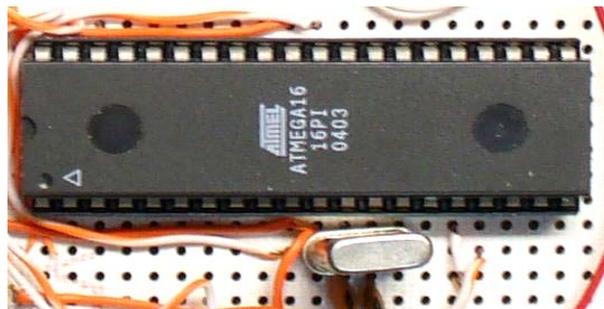


Figura 60. Fotografía del microcontrolador utilizado en la interfaz electrónica.



**b) Relevadores Electromecánicos:** Los relevadores electromecánicos son interruptores activados por un pulso eléctrico, cuya magnitud de voltaje varía de acuerdo al modelo. La función principal de estos relevadores es la de convertir las señales digitales en analógicas que suministren la energía suficiente para mover al motor de “dc”. Los relevadores utilizados se activan con un voltaje de 5 Vdc y una corriente de 20 mA y son fabricados por la compañía “Sun Hold” (Ver figura 61).

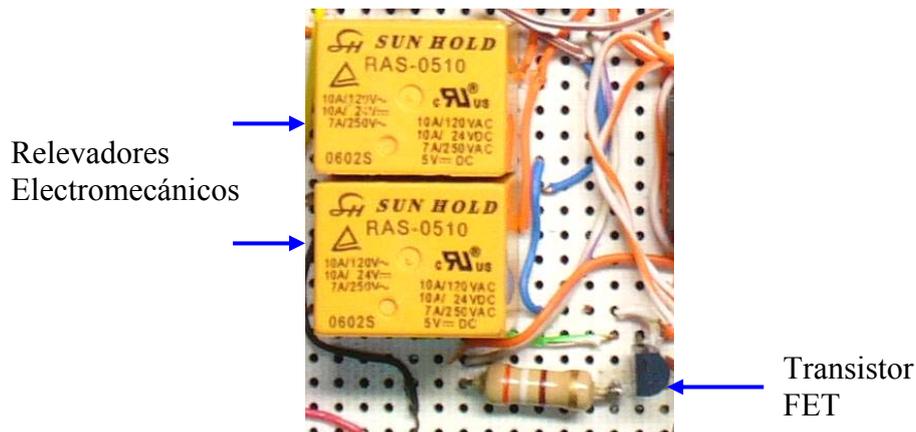


Figura 61. Fotografía de los relevadores electromecánicos.

**c) Transistores Fet:** El transistor utilizado es el 2N7000 y fue implementado para generar la corriente necesaria para activar al relevador electromecánico (Ver figura 61). A su vez otra etapa de transistores fue implementada para controlar los giros del motor que controla al eje Z (Ver figura 62).

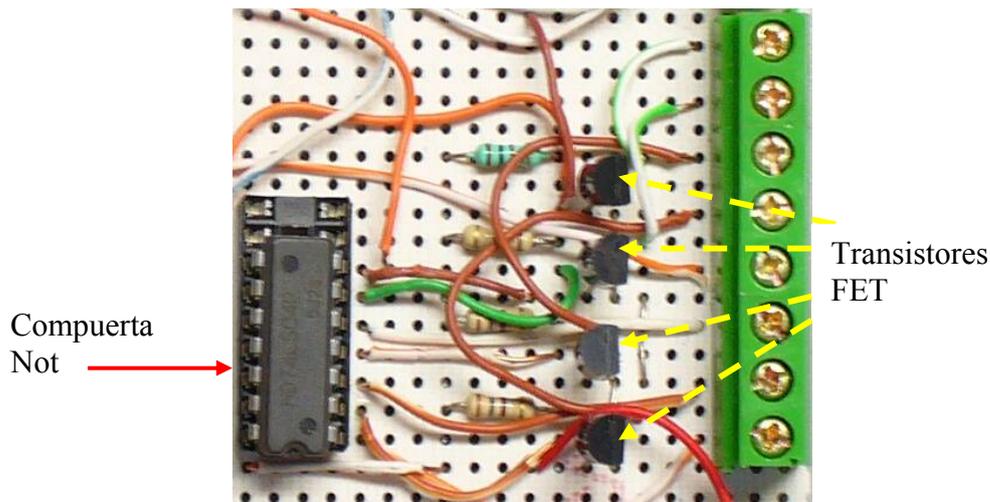
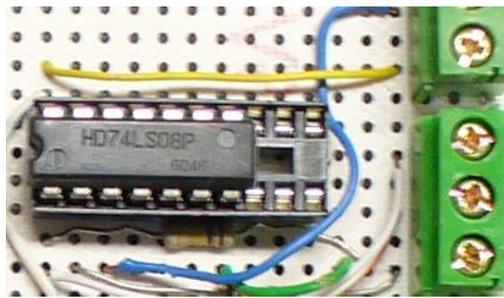


Figura 62. Fotografía de los transistores utilizados para amplificar la corriente necesaria para hacer girar el motor a pasos del eje Z.

**d) Compuerta “Not”:** Debido a que los transistores FET son de tipo “N”, invierten la señal de salida con respecto a la señal de entrada, esto quiere decir que si en la entrada del transistor se introduce un bit lógico “1”, a la salida del transistor se obtendrá un bit lógico “0”. Este comportamiento provocaba que la señal de sincronía del motor a pasos del eje Z, no funcionara adecuadamente. El funcionamiento de esta “compuerta Not” es invertir el estado lógico de un bit. Al aplicar esta compuerta a la salida del transistor FET se invierte nuevamente el dato de salida del transistor. El circuito integrado utilizado es el “74LS04”. Así se corrigió el problema (Ver figura 62).

**e) Compuerta “AND”:** La compuerta “AND” es un circuito que multiplica los estados lógicos de entrada. Este circuito integrado fue implementado para revisar los estados lógicos de los sensores mecánicos y ópticos. De esta manera es posible determinar el límite al que puede llegar el eje de la bandeja de los micropozos (Ver figura 63). El circuito utilizado es el “74LS08”



*Figura 63. Fotografía del circuito integrado utilizado para revisar los estados lógicos de los sensores mecánicos y ópticos*

Para el uso de la interfaz de control, es necesario contar con una fuente de alimentación que se encargue de suministrar la energía necesaria para que la interfaz funcione y para que los motores funcionen. La fuente que se utilizó, es una fuente conmutada dual de 5 Vdc @ 3.0 Amp. y 12 Vdc @ 0.5 Amp, fabricada por la compañía “Heng Fu” (Ver figura 64).



Figura 64. Fuente de alimentación implementada para energizar la interfaz de control y los motores.

Para poder establecer la comunicación entre el robot y la computadora, fue necesario implementar una segunda interfaz que se encargue de controlar las acciones de la interfaz de control, pero que a su vez permita transmitir los datos adquiridos por la interfaz de control usando un protocolo serial “USB”. La interfaz implementada es la “NI-DAQ 6008”, fabricada por la compañía “National Instruments” (Ver figura 65).

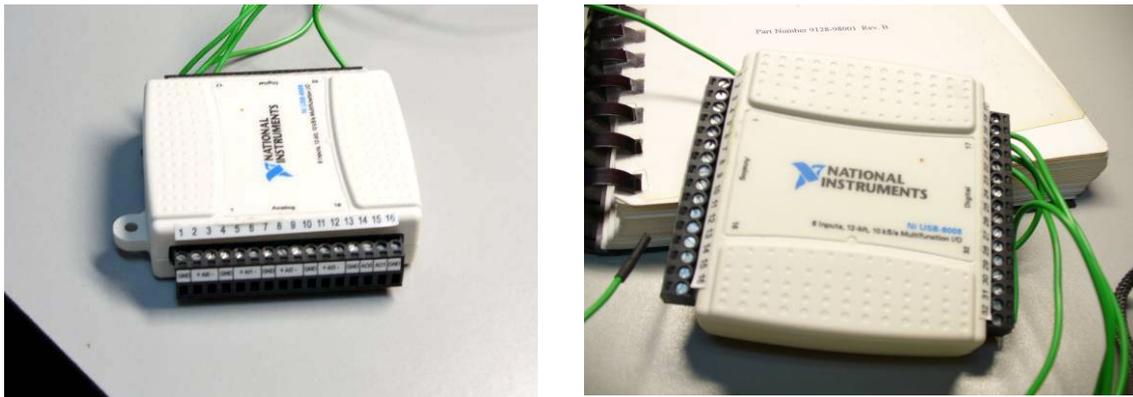


Figura 65. Fotografía de la interfaz USB DAQ 6008 fabricada por la compañía “National Instruments”.

Esta interfaz tiene 12 bits lógicos digitales, que pueden ser configurados como entradas ó salidas, además cuenta con 4 entradas analógicas, terminales de tierra digital y terminales que proporcionan un voltaje analógico fijo de salida de 2.5 Vdc.

## 4.3 DISEÑO DE SOFTWARE

El software fue diseñado con un programador gráfico virtual llamado “LabVIEW versión 7.1”.

### PROGRAMA DE CONTROL LABVIEW

LabVIEW es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben sino que se dibujan, que incluye funciones integradas para la realización de adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. El lenguaje que usa se llama lenguaje G.

Este programa fue creado por **National Instruments** (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y Linux y va en la versión 8.0 (Dic. 2005).

Los programas hechos con LabVIEW se llaman VI (*Virtual Instrument*), lo que da una idea de uno de sus principales usos: el control de instrumentos. El lema de LabVIEW es: "*La potencia está en el Software*". Esto no significa que la empresa haga únicamente software, sino que busca combinar este software con todo tipo de hardware, tanto propio -tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, y otro Hardware- como de terceras empresas.

Un programa se divide en *Panel Frontal* y *Diagrama de bloques*. El *Panel Frontal* es el interfaz con el usuario, en él se definen los *controles* e *indicadores* que se muestran en pantalla. El *Diagrama de Bloques* es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan.

Es usado principalmente por ingenieros y científicos para tareas como:

- Adquisición de datos
- Control de instrumentos
- Automatización industrial o PAC (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de control: prototipos rápidos.

Su principal característica es la facilidad de uso, personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabView y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Para los amantes de lo complejo, con LabView pueden crearse programas de miles de VIs (páginas de código) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación.

LabView presenta facilidades para el manejo de interfaces de comunicaciones: puerto serie, puerto paralelo, GPIB, USB, etc., capacidad de interactuar con otras aplicaciones: ActiveX, Matlab, Simulink...etc., herramientas para el procesado digital de señales, visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos, adquisición y tratamiento de imágenes, control de movimiento, tiempo real estrictamente hablando, programación de FPGAs, sincronización.

LabVIEW está altamente integrado con el hardware de medida, con lo que se puede configurar y usar rápidamente cualquier dispositivo de medida que se tenga. LabVIEW puede conectarse a miles de instrumentos de medida para construir sistemas de medida completos, incluyendo desde cualquier tipo de instrumento autónomo hasta dispositivos de adquisición de datos, controladores de movimiento y sistemas de adquisición de imagen. Además LabVIEW trabaja con más de 1000 librerías de instrumentos de cientos de fabricantes, y muchos fabricantes de dispositivos de medida incluyen también herramientas de LabVIEW con sus productos.

#### **4.4 PROPUESTA DE PUNTOS QUE PUEDEN SER CONTROLADOS POR EL USUARIO EN EL SOFTWARE**

El usuario podrá controlar los siguientes parámetros del robot:

- Seleccionar las unidades de desplazamiento del robot, para la fabricación de microarreglos, las unidades son:  $\mu\text{m}$ , mm y cm.

- Seleccionar un arreglo geométrico de microarreglos almacenados previamente en una base de datos ó proponer uno nuevo.
- Seleccionar el inicio de proceso
- Seleccionar pausa de proceso.
- Seleccionar paro de emergencia del proceso
- Seleccionar cerrar el programa para volver al ambiente Windows

El software diseñado se muestra en la figura 66.

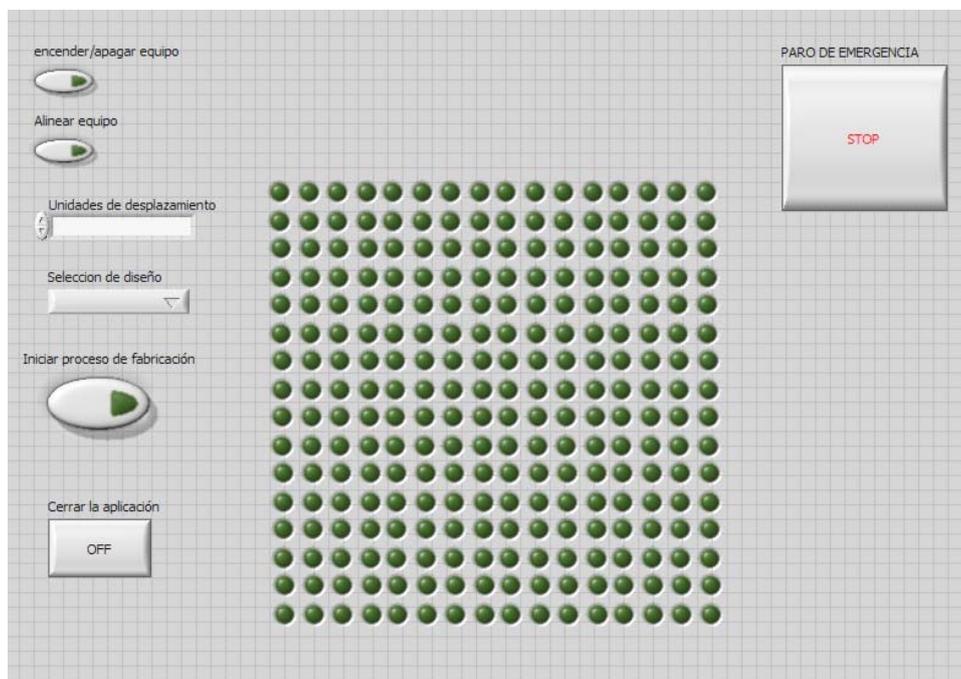


Figura 66. Imagen de la pantalla del software de usuario propuesto como prototipo.

## 4.5 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

El software funciona de la siguiente manera:

- 1) Al abrir el software, se envía una señal por la interfaz DAQ USB a la interfaz de control, que le indica que debe energizar al robot (Ver figura 67).

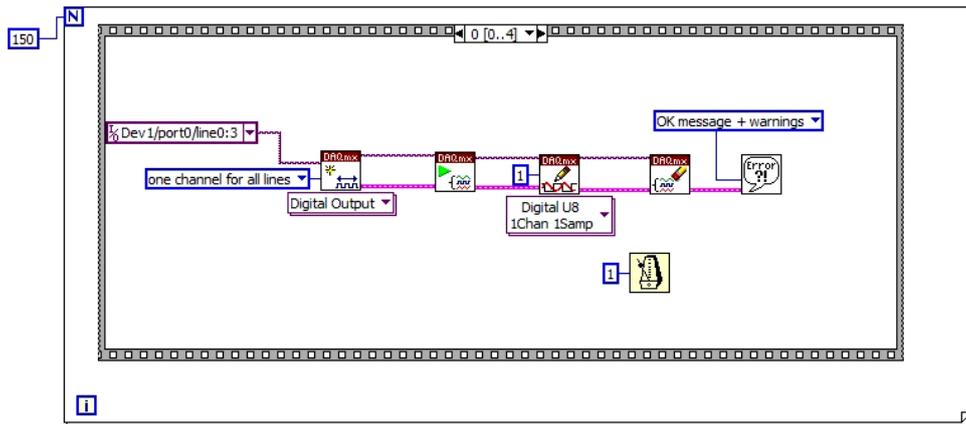


Figura 67. Diagrama de flujo que envía la señal de encendido del robot.

2) Posteriormente el software comprueba la comunicación entre el robot y la computadora. Si no es satisfactoria se envía un mensaje al usuario, que notifica que la comunicación fallo y que debe de revisar que el cable de comunicación entre el robot y la PC se encuentre conectado y que revise que el cable de línea se encuentre conectado a la toma de corriente. Si el usuario hace caso omiso a este mensaje, entonces el mensaje seguirá apareciendo hasta que se cumplan las condiciones programadas que comprueban la correcta comunicación (Ver figura 68).

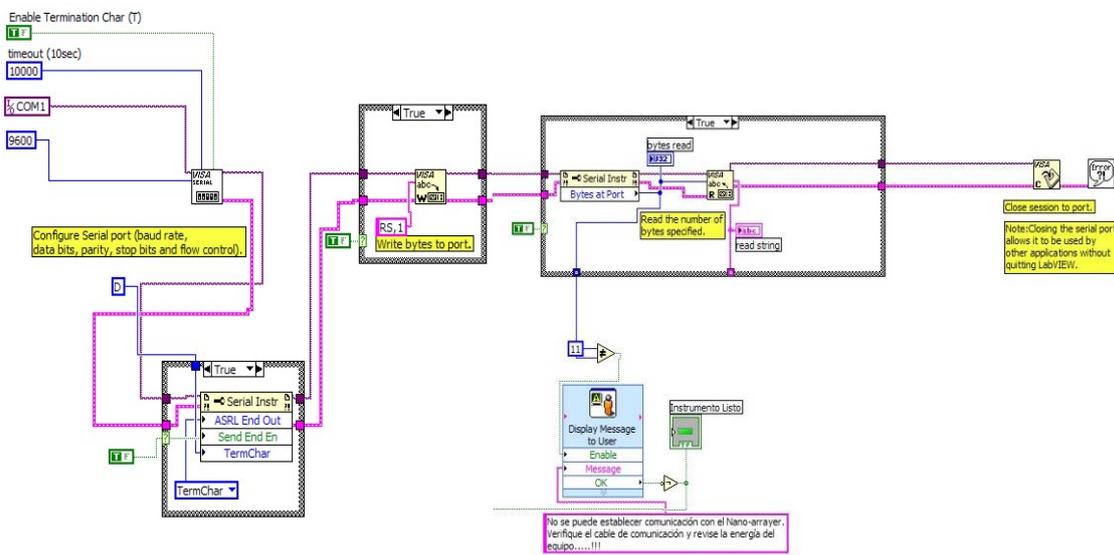


Figura 68. Diagrama de bloques del proceso de comprobación de comunicación.

3) Si el punto 2 se cumple, entonces el software espera a que el usuario ejecute alguna acción. Hasta este punto, el usuario puede escoger seleccionar un arreglo de la base de datos ó proponer uno (Ver figura 69).

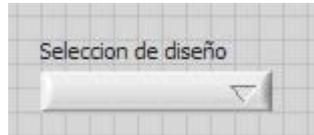


Figura 69. Botón de selección de diseño

4) Una vez seleccionado ó propuesto el arreglo, el usuario debe de seleccionar las unidades con las que desea trabajar y posteriormente presionar el botón de inicio (Ver figura 70).

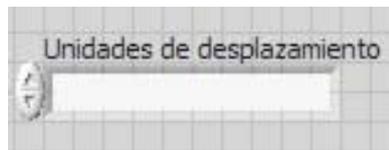


Figura 70. A la izquierda se muestra una casilla donde el usuario puede seleccionar las unidades de desplazamiento del robot; Al lado derecho se muestra el botón de inicio de proceso de fabricación

5) El software envía cadenas de datos que permiten sincronizar los movimientos del robot. Estas cadenas de datos se envían directamente, usando la interfaz DAQ-USB 6008. En la figura 71 se muestran diagramas de bloques que ilustran una parte de este procedimiento.

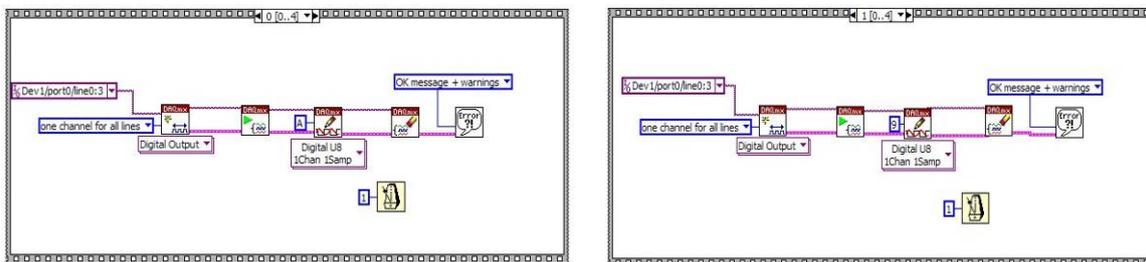


Figura 71. Diagrama de bloques que representa el envío de datos que se encargan de sincronizar los movimientos del robot



**Resumen.** En este capítulo se mostró al lector, el desarrollo de Hardware y Software del robot. En la etapa de **Hardware** se explicaron las funciones principales del diseño mecánico y la importancia de implementar determinados circuitos electrónicos que permitan llevar a cabo la sincronización en los movimientos del robot. En la etapa de **Software**, se menciona con que lenguaje de programación fue desarrollado el programa de usuario, así como las ventajas que este ofrece al programador en la realización de programas, se establecieron los puntos con los que cuenta el programa y que permiten al usuario interactuar remotamente con las acciones del robot. Se mostraron algunos diagramas de bloques que ejecuta el programa para comunicarse con el robot. Finalmente se mostró el diagrama de flujo que realiza el robot para la fabricación de microarreglos.

## REFERENCIAS DEL CAPITULO IV

### **Internet:**

[http:// isa.aut.uah.es/Robotica/tema1.pdf](http://isa.aut.uah.es/Robotica/tema1.pdf) (fundamentos de robotica)

[http:// www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EE05101M.pdf](http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EE05101M.pdf) (inteligencia artificial)

[http:// cfievalladolid2.net/tecno/ctrl\\_rob/robotica/](http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_rob/robotica/) (robotica)

[http:// www.atmel.com](http://www.atmel.com)

[http:// www.national.com](http://www.national.com)

[http:// www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

[http:// www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com)

[http:// www.ni.com](http://www.ni.com)

[http:// www.sunhold.com](http://www.sunhold.com)

[http:// www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

[http:// www.crouzet.com](http://www.crouzet.com)

[http:// www.barmex.com.mx](http://www.barmex.com.mx)

*Robotics course.* Universitat Jaume I. [www.stalker.es/personal/robotica/main.html](http://www.stalker.es/personal/robotica/main.html)

*Robótica Industrial.* [www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html](http://www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html)

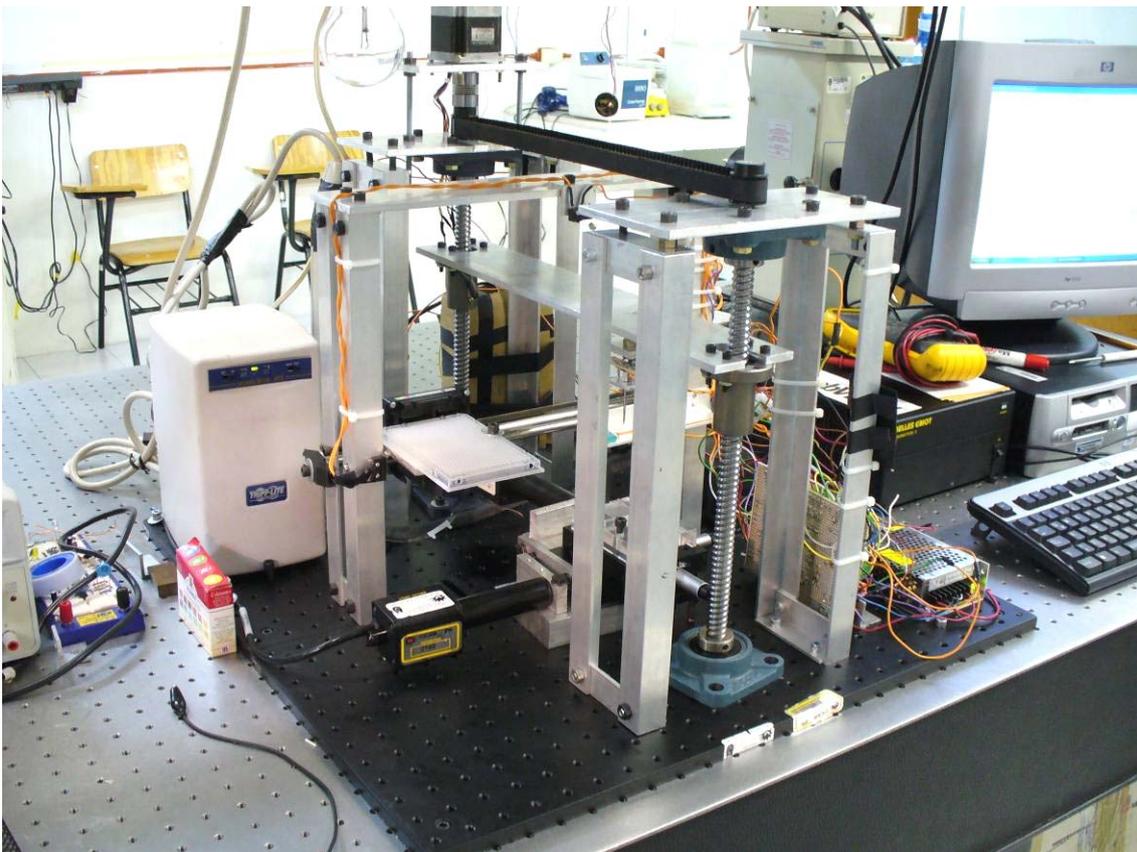
*Tutorial sobre robótica.* [www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm](http://www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm)

# Capítulo 5

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

---

En la figura 73 se muestra una fotografía del robot desarrollado para la fabricación de microarreglos de ADN, con la integración de los componentes mecánicos y electrónicos, mencionados en el capítulo IV.



*Figura 73. Fotografía del robot desarrollado para la fabricación de microarreglos de ADN.*

El robot se compone de 3 etapas principales como son: desarrollo mecánico, desarrollo electrónico y desarrollo de software. En el desarrollo mecánico, se utilizaron ángulos de aluminio de 3 mm de espesor por 1 pulgada de ancho para la fabricación de postes que evitaran la inestabilidad de los tornillos embalados del eje Z. Se fabricó la base que sostiene a la punta metálica de titanio (Ver figura 74).

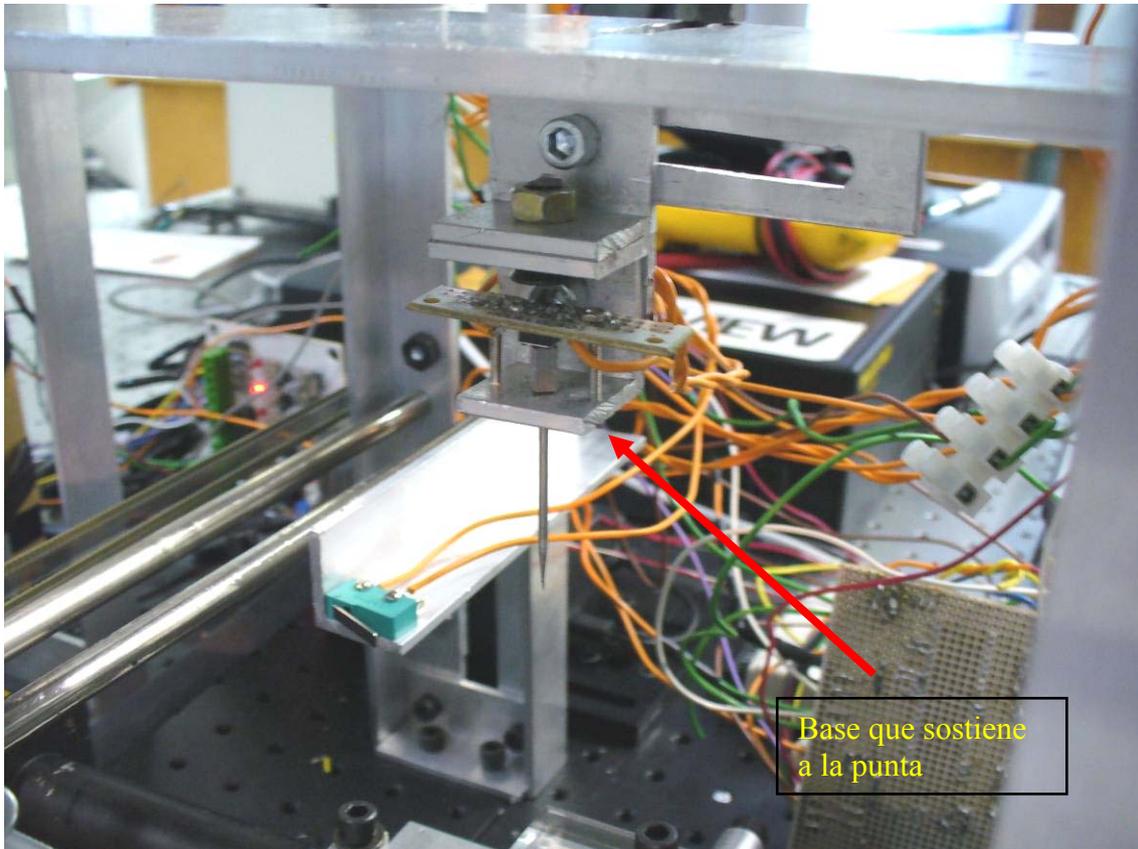


Figura 74. Fotografía que muestra la base de aluminio, que sostiene a la punta.

Se implementaron sensores de toque en el eje de desplazamiento “Z” y en el eje de desplazamiento de la bandeja de los micropozos “X” (Ver figura 75).

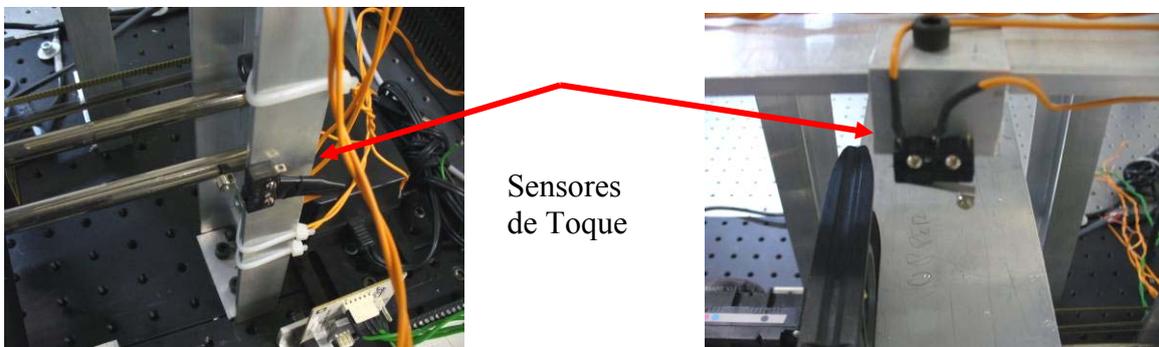
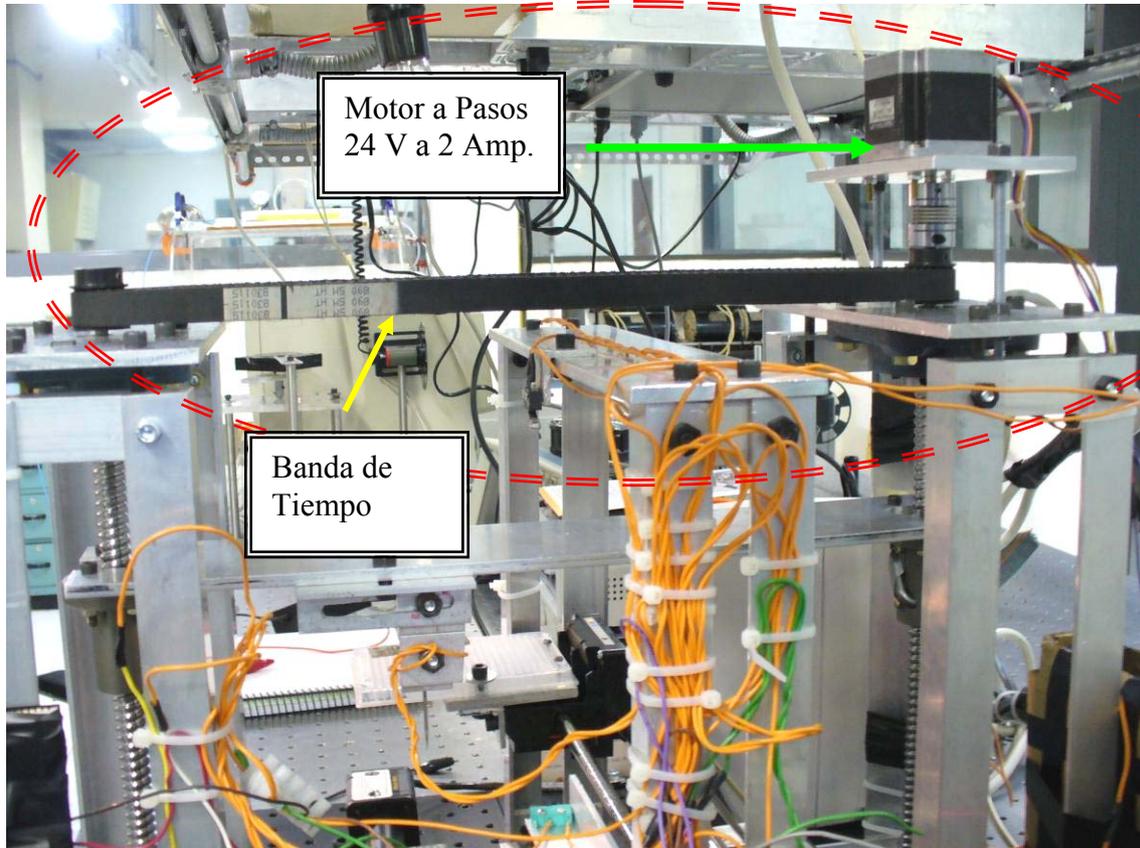


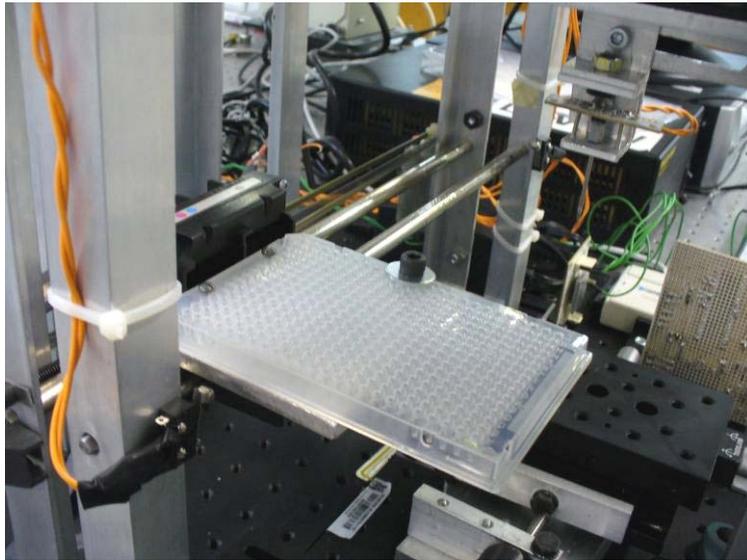
Figura 75. Fotografía de los sensores de toque.

Estos sensores permitieron dar la precisión de los desplazamientos, tanto del eje “Z”, así como de la posición en la que se encontraba la bandeja de los micropozos. Se implemento un motor de 2 Amps a 24 Volts que tuviera el torque suficiente para poder desplazar los tornillos embalados, interconectados entre si por una banda de tiempo (Ver figura 76)



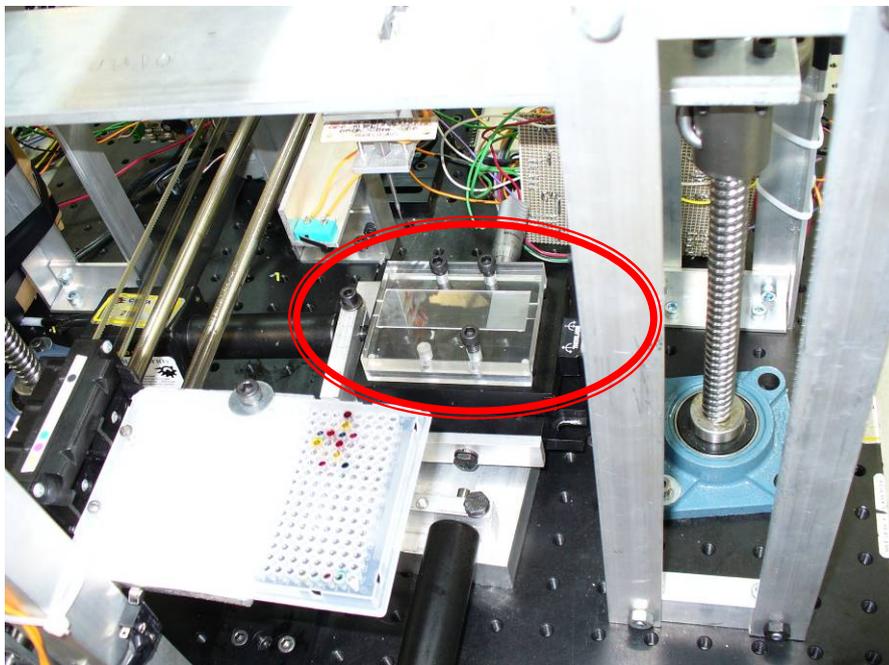
*Figura 76. Fotografía lateral que muestra el motor a pasos que controla el desplazamiento del eje “Z”. Mediante una banda de tiempo se controla la sincronía de los dos tornillos.*

La implementación de una bandeja de micropozos fue útil para el almacenamiento temporal de la solución utilizada (Ver figura 77).



*Figura 77. Fotografía de la bandeja de los micropozos, montada sobre un eje de desplazamiento “X”.*

Se fabrico e implemento una base para portaobjetos, que sostiene al portaobjetos de vidrio, pero que a su vez permite desplazar al portaobjetos en dos direcciones “X” y “Y”, permitiendo así, poder fabricar arreglos matriciales sobre él (Ver figura 78).



*Figura 78. Fotografía que muestra un portaobjetos de vidrio sobre una base sujeta a una plataforma que permite desplazamientos en dos dimensiones “X” y “Y”.*

Otra etapa importante fue el acoplamiento electrónico al sistema mecánico, que permitiera mover los motores del sistema, pero que a su vez permitiera sensar las posiciones de los ejes. Para lograr este objetivo, se utilizaron las interfaces mencionadas en el capítulo IV (Ver figura 79).

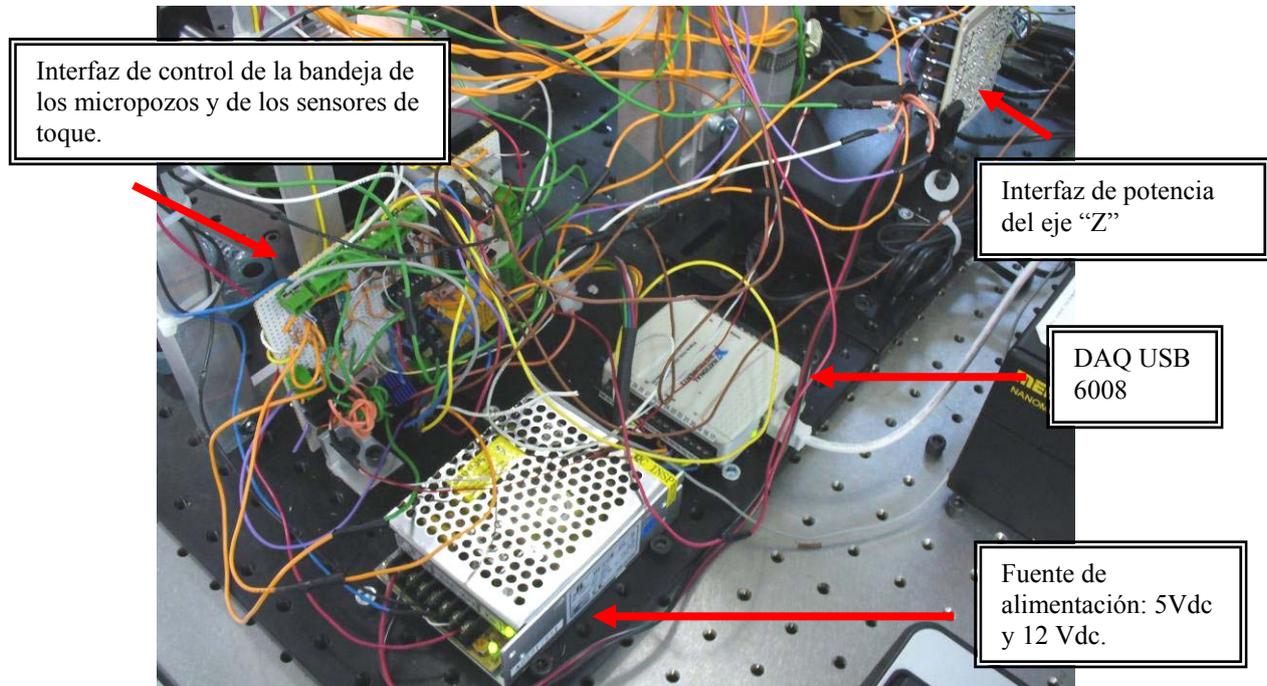
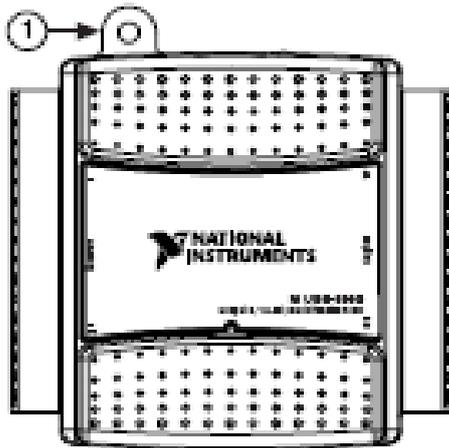


Figura 79. Fotografía de las conexiones entre las interfaces digitales, analógicas y el sistema mecánico.

La fuente de alimentación se utilizó para suministrar la energía eléctrica a la interfaz de control. La interfaz de control se encarga de sensar las posiciones tanto del eje "Z", como del eje "X" que desplaza la bandeja de los micropozos, además de controlar a su vez la velocidad y dirección de esta. Sin embargo, la interfaz principal que se encarga de sincronizar los movimientos del robot es el "DAQ USB 6008". La configuración de señales controladas por el DAQ USB 6008 se muestran en la figura 80.



P0.0 = Indica la dirección del eje “Z” (hacia Arriba ó hacia abajo).

P0.1 = Envía la sincronía de pulsos para que el motor del eje “Z” avance.

P0.2 = Se utiliza para habilitar las bobinas del motor del eje “Z”.

Figura 80. DAQ USB 6008

P0.4 = Utilizado para el encendido del robot.

P0.5 = Monitoreo de los sensores de toque del eje “X” (bandeja de los micropozos).

P0.6 = Monitoreo de los sensores de toque del eje “Z” (punta metálica de titanio).

P0.7 = Monitoreo del “No-Break” para sensar la ausencia de la energía eléctrica.

P1.0 = Controla el sentido de desplazamiento del eje “X” (bandeja de los micropozos), Izquierda ó derecha.

P1.1 = Controla el pulso que genera la interrupción del AVR, para poder generar el Avance del motor del eje “X” (bandeja de los micropozos).

P1.2 = Adquiere los pulsos emitidos por el sensor óptico del eje “X” (bandeja de los Micropozos).

El software desarrollado tiene las siguientes características (Ver figura 81):

- Encendido del Equipo.
- Monitoreo de energía.
- Botón de paro de emergencia.
- Fabricación del arreglo geométrico.
- Selección de unidades entre spots de ADN.
- Botón de inicio de proceso.
- Botón de pausa del proceso.
- Botón de cierre para salir a Windows.

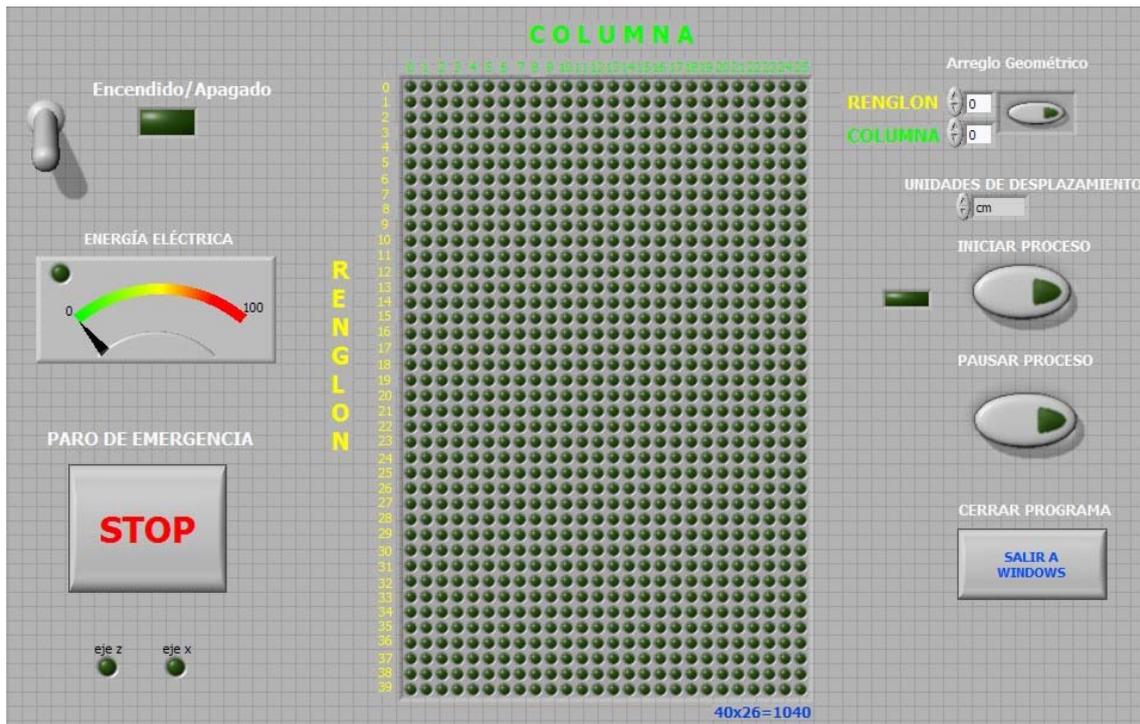


Figura 81. Software Final desarrollado.

El programa del software se describe a continuación:

- 1) Al ejecutar el software, el usuario visualiza una pantalla que le pide que asigne una contraseña para poder hacer uso del robot (ver figura 82):

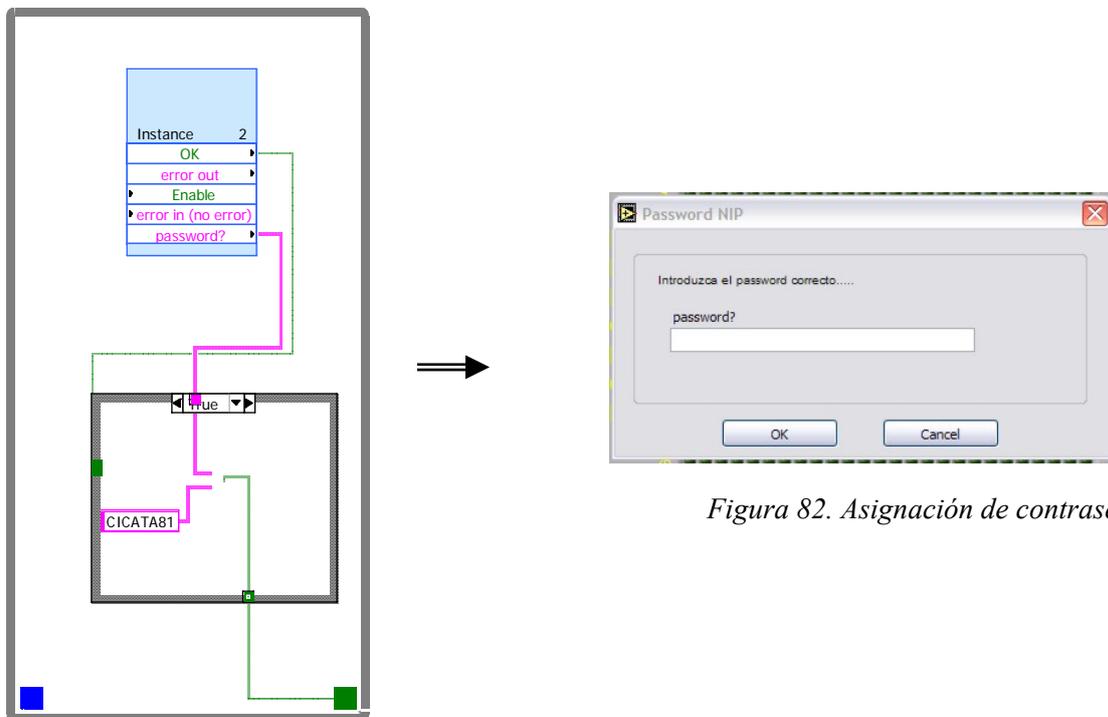


Figura 82. Asignación de contraseña

2) Una vez asignada la contraseña correcta, el usuario puede encender el sistema electrónico del robot (Ver figura 83).

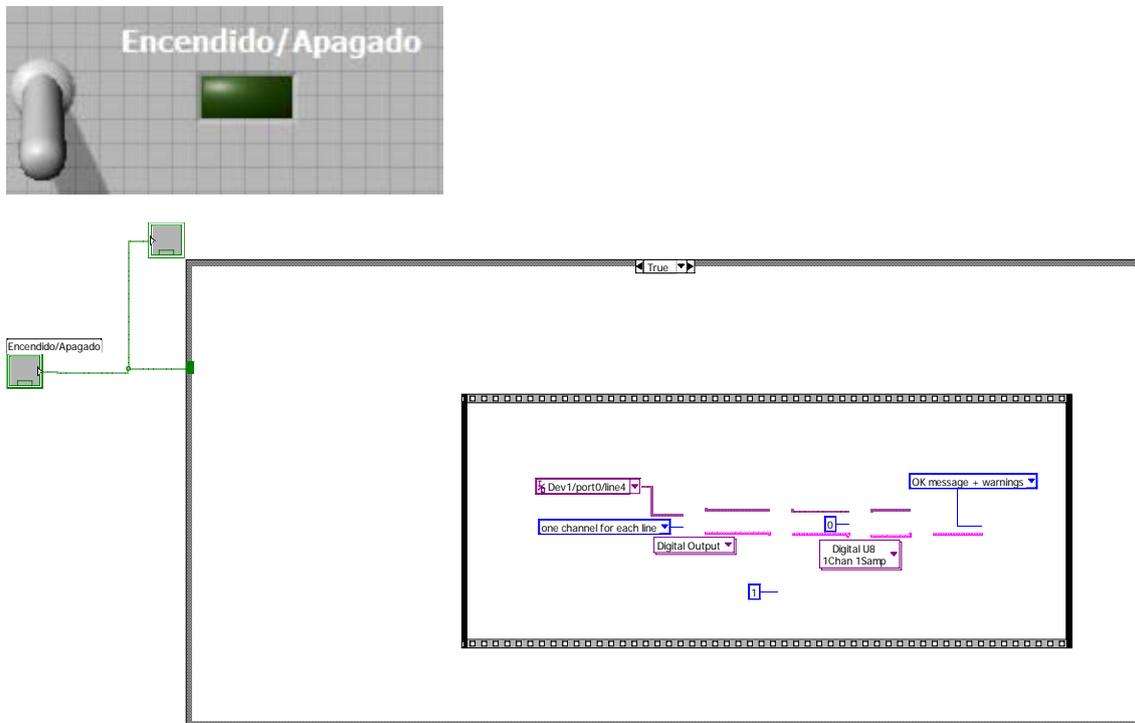


Figura 83. En esta figura se muestra un diagrama de bloques que corresponde a la programación del comando de encendido del equipo. Esto se realiza enviando un bit lógico por el puerto P0.4 del DAQ USB 6008.

3) Una vez encendido el equipo, el software monitorea la alimentación del robot, para revisar si es adecuada para su funcionamiento ó no (Ver figura 84).

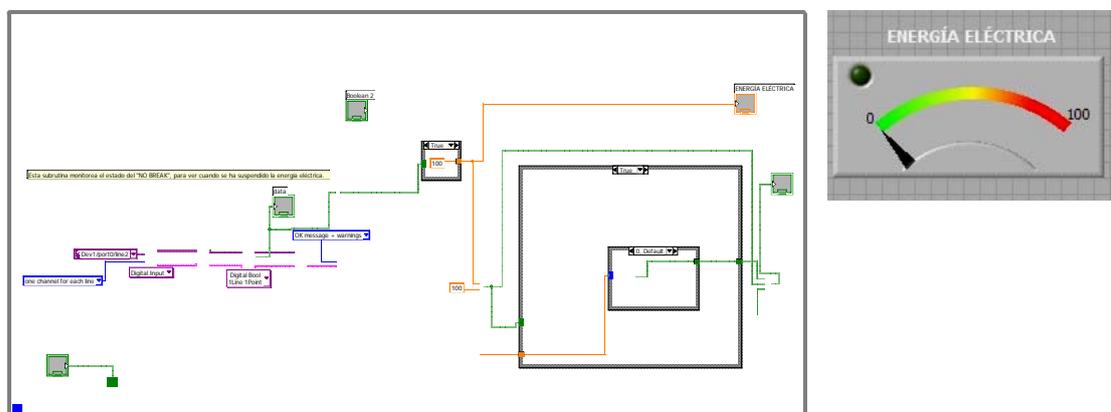


Figura 84. Diagrama de bloques de la subrutina que monitorea la energía eléctrica del robot, utilizando el puerto P0.7 del DAQ USB 6008.

4) El usuario puede proponer un arreglo matricial utilizando las teclas de columna y renglón, además del botón de estado lógico binario (Ver figura 85).

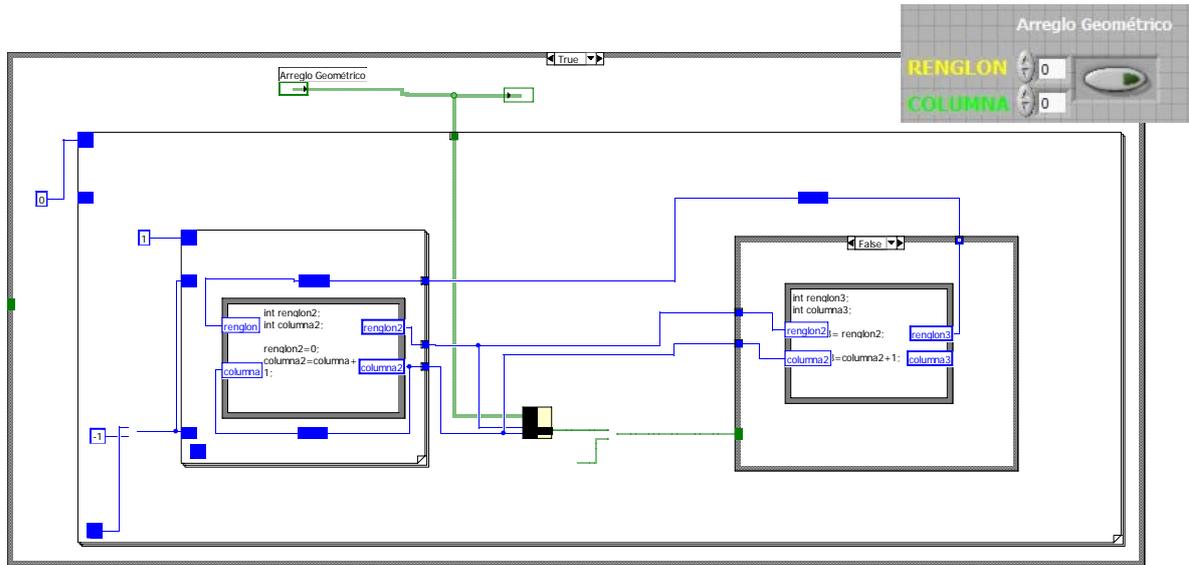


Figura 85. Esta subrutina permite al usuario proponer el arreglo matricial a fabricar sobre el portaobjetos de vidrio.

5) El usuario puede seleccionar las unidades de desplazamiento de los nanoposicionadores asignados al desplazamiento del portaobjetos, permitiendo así un arreglo matricial de spots de ADN con diferentes distancias entre ellos (ver figura 86).

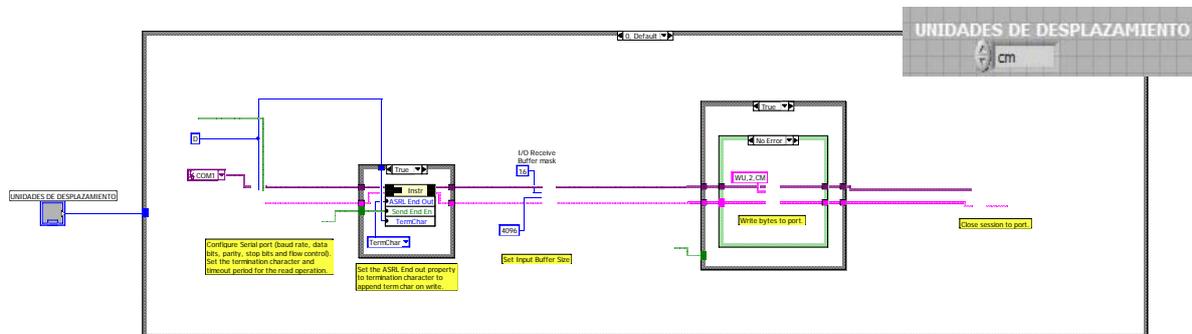


Figura 86. Subrutina del programa que permite al usuario asignar las unidades de desplazamiento de los nanoposicionadores con el objetivo de poder modificar la distancia entre cada spot de ADN.

6) El usuario puede seleccionar cuando empezar el proceso de fabricación y cuando pausarlo utilizando dos botones de acción (ver figura 87).

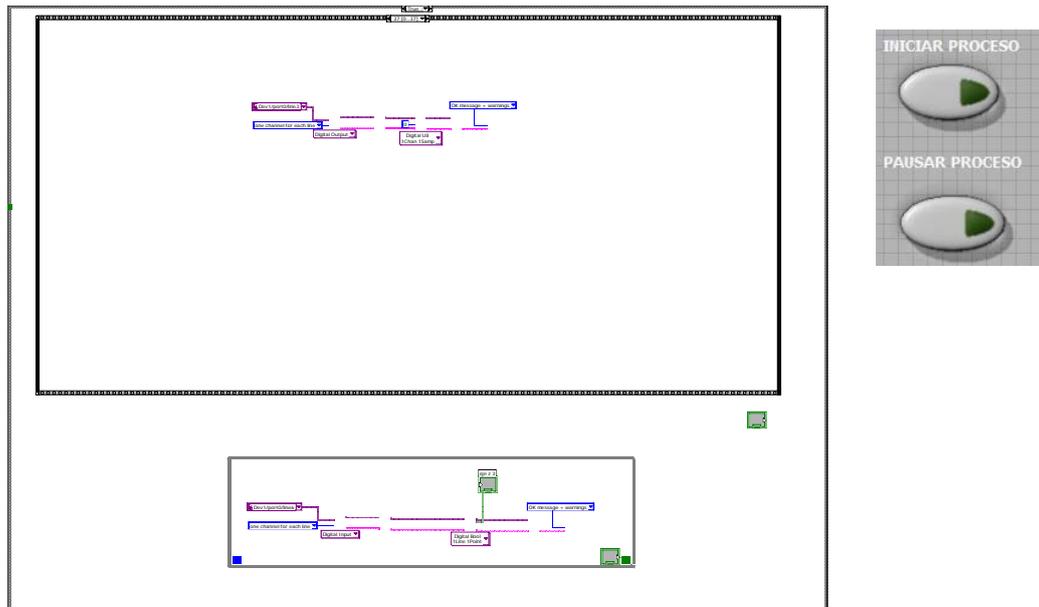


Figura 88. Con esta subrutina el software permite al usuario controlar el inicio y pausa del proceso de fabricación de los microarreglos.

### Impresión de matrices de puntos.

Con el sistema montado procedimos a imprimir arreglos de puntos en forma matricial, el programa se desarrollo de acuerdo con el diagrama de flujo mostrado en la figura 72 del capítulo 4.

Inicialmente, imprimimos una matriz de 5x5 puntos separados por 1000 micras, usamos una punta de tungsteno de un área de 250 micras de diámetro. En la figura 89 mostramos la fotografía obtenida con un microscopio, la imagen muestra el resultado de la secuencia del barrido automático donde cada una de las manchas corresponde a un deposito de la punta. Notamos que la separación de las impresiones es uniforme, con pequeñas variaciones en la posición. Las manchas tienen morfología diferente una respecto a otra debido a problemas en el pegado.

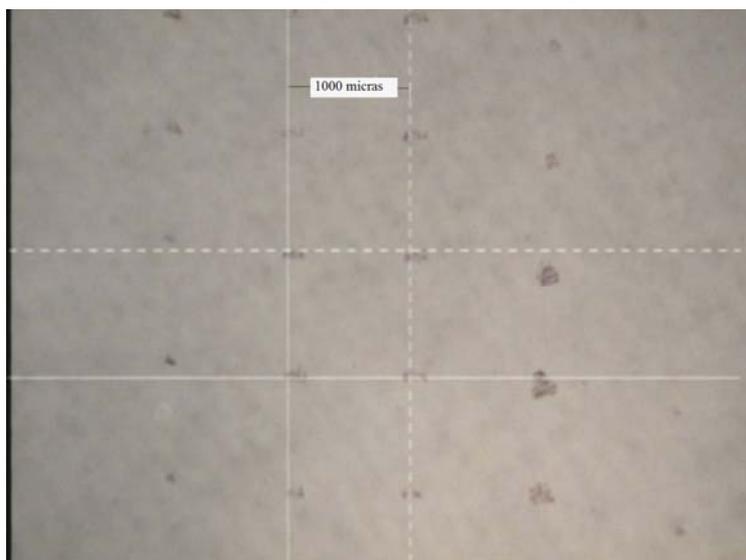


Figura 89. Arreglo matricial de 5x5 impresiones separadas por 1mm entre centros.

## CONCLUSIONES

- ✓ En esta tesis se obtuvo el diseño, construcción y control de un robot compuesto de dos módulos bidimensionales para la fabricación de microarreglos. El diseño conceptual del robot permite su adaptación a las diversas exigencias del desarrollo de los microarreglos.
- ✓ Se diseñaron y fabricaron las partes mecánicas, numerosos circuitos eléctricos y se desarrolló el software para la automatización del robot.
- ✓ Se diseñó el circuito electrónico de control por módulos y procesamiento de señales analógicas y digitales que permiten sincronizar los movimientos del robot.
- ✓ El software se desarrolló en lenguaje gráfico usando como herramienta el LABVIEW 7.1 Profesional que controlara salidas y entradas digitales de los puertos RS-232, y USB 2.0, con el objetivo de que el usuario tuviera una comunicación directa con el robot.
- ✓ Se muestra el funcionamiento del robot en la fabricación de una matriz ordenada. Las imágenes muestran una separación uniforme y constante que muestran la reproducibilidad y precisión obtenida por el sistema.
- ✓ Se obtuvieron diferentes matrices variando la separación y geometría de los depósitos. La capacidad de obtener matrices específicas son de especial interés en las aplicaciones de microarreglos.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- F.S. Ligler and C. Rowe Taitt (Eds.), *Optical Biosensors: Present and future*. Elsevier, Amsterdam, 2002.
- C. Domínguez, L.M. Lechuga and J.A. Rodríguez, In: S. Alegret (Ed.), *Integrated Analytical Systems*. Elsevier, Amsterdam, 2003, ISBN: 0-444-51037-0.
- R.P.H. Kooyman and L.M. Lechuga, In: E. Kress-Rogers (Ed.), *Handbook of Biosensors: Medicine, Food and the Environment*. CRC Press, FL, USA, 1997, pp. 169–196.
- L.M. Lechuga, *Quím. Anal.*, 19 (2000) 61–67.
- H. Raether, *Surface plasmons oscillations and their applications*. *Physics of Thin Films*, Vol. 9. Academic Press, FL, USA, 1977, pp. 145–262.
- J. Homola, *Anal. Bioanal. Chem.*, 377 (2003) 528–539.
- L.M. Lechuga, A. Calle and F. Prieto, *Quím. Anal.*, 19 (2000) 54–60.
- T. Weimar, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 39 (2000) 1219–1221.
- T.A. Morton and D.G. Myszka, *Methods Enzymol.*, 295 (1998) 268–294.
- S. Marose, C. Lindemann, R. Ulber and T. Scheper, *Trends Biotechnol.*, 17 (1999) 30–34.
- R.L. Rich and D.G. Myszka, *Trends Microbiol.*, 11 (2003) 124–133.
- C.R. Lawrence and N.J. Geddes, In: E. Kress-Rogers (Ed.), *Handbook of Biosensors: Medicine, Food and the Environment*. CRC Press, FL, USA, 1997, pp. 149–167.

- M. Mehrvar, C. Bis, J.M. Scharer, M. Moo-Young and H. Luong, *Anal. Sci.*, 6 (2000) 677–692.
- J. Homola, S. Yee and D. Myszka, In: F.S. Ligler and C. Rowe Taitt (Eds.), *Optical Biosensors: Present and Future*. Elsevier, Amsterdam, 2002.
- J. Homola, J. Ctyroky, M. Skalsky, J. Hradilova and P. Kolarova, *Sens. Actuators B*, 38/39 (1997) 286–290.
- J. Dosta´lek, J. Ctyroky, J. Homola, E. Brynda, M. Skalsky, P. Nekvindova` , J. Skvor and J. Schro¨fel, *Sens. Actuators B*, 3722 (2001) 1–5.
- J. Homola, H.B. Lu, G.G. Nenninger, J. Dosta´lek and S.S. Yee, *Sens. Actuators B*, 3786 (2001) 1–8.
- A.A. Kolomenskii, P.D. Gershon and A. Schuessler, *Appl. Opt.*, 36 (1997) 6539–6547.
- T. Chinowsky, L. Jung and S. Yee, *Sens. Actuators B*, 54 (1999) 89–97.
- W.M. Mullett, E.P.C. Lai and J.M. Yeung, *Methods*, 22 (2000) 77–91.
- T. Akimoto, S. Sasaki, K. Ikebukuro and I. Karube, *Biosens. Bioelectron.*, 15 (2000) 355–362.
- P.D. Hansen and A. Usedom, In: F.W. Scheller, F. Schubert and J. Fedrowitz (Eds.), *Frontiers in Biosensorics II*. Birkha¨user Verlag, Switzerland, 1997.
- S. Busse, M. DePaoli, G. Wenz and S. Mittler, *Sens. Actuators B*, 80 (2001) 116–124.

- Taylor R.F. and Schultz, J.S. (1996) *Handbook of Chemical and Biological Sensors*. Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
- Zhai J., Hong, C. and Yang, R. (1997) *Biotechnol. Adv.*, **15**, 43–58.
- Palecek E., Fojta, M., Tomshick, M. and Wang, J. (1998) *Biosens. Bioelectron.*, **13**, 621-628.
- Campàs i Homs, Mònica ;Functional oligonucleotide recognition nanomodules for electrochemical DNA biosensors; April 17, 2002.
- Cheng J., Sheldon, E., Wu, L., Gerrue, L., Carrino, J., Heller, M. and O'Connell, J. (1998) *Nat. Biotechnol.*, **16**, 541–545.
- H. Raether, Surface plasmons oscillations and their applications. *Physics of Thin.*
- T. Chinowsky, L. Jung and S. Yee, *Sens. Actuators B*, **54** (1999) 89-97.
- *Introduction to Robotics. Mechanics & Control*, J. Craig, Addison-Wesley.
- *Robot Builder's Bonanza: 99 Inexpensive Robotics Projects*, Gordon McComb, McGraw-Hill.
- *Robótica*. Universidad de Guadalajara. México.  
[proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/](http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/)
- *Curso de robótica móvil*. Aperobot.  
[usuarios.bitmailer.com/aperobot/indice\\_tutorial.html](http://usuarios.bitmailer.com/aperobot/indice_tutorial.html)
- *Control de Robots y sistemas sensoriales*. ISA. Universitas Miguel Hernández:  
[3w.umh.es/](http://3w.umh.es/)
- *Robótica*. Universidad Rey Juan Carlos.  
[gysc.escet.urjc.es/docencia/asignaturas/robotica/](http://gysc.escet.urjc.es/docencia/asignaturas/robotica/)

- *Robotics course.* Universitat Jaume I.  
[www.stalker.es/personal/robotica/main.html](http://www.stalker.es/personal/robotica/main.html)
- *Robótica Industrial.* [www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html](http://www.chi.itesm.mx/~cim/ri.html)
- *Tutorial sobre robótica.* [www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm](http://www.chi.itesm.mx/~cim/tutor/tutor.htm)
- *LEGO- Robotics Network.* [www.lego.com/robotics/robotic-intro/default.asp](http://www.lego.com/robotics/robotic-intro/default.asp)
- Sitio Web de Fischertechnik. <http://www.fischertechnik.com/>
- *TodoRobot.* <http://www.todorobot.com.ar/>
- *Creaturoides.* <http://www.creaturoides.com/>
- *All about robots.* [www.occdsb.on.ca/~proj4632/learnmore.htm](http://www.occdsb.on.ca/~proj4632/learnmore.htm)

### **Internet:**

- [http:// isa.aut.uah.es/Robotica/tema1.pdf](http://isa.aut.uah.es/Robotica/tema1.pdf) (fundamentos de robotica)
- [http:// www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EE05101M.pdf](http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EE05101M.pdf) (inteligencia artificial)
- [http:// cfievalladolid2.net/tecnocntrl\\_rob/robotica/](http://cfievalladolid2.net/tecnocntrl_rob/robotica/) (robotica)
- [http:// www.atmel.com](http://www.atmel.com)
- [http:// www.national.com](http://www.national.com)
- [http:// www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)
- [http:// www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com)
- [http:// www.ni.com](http://www.ni.com)
- [http:// www.sunhold.com](http://www.sunhold.com)
- [http:// www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)
- [http:// www.crouzet.com](http://www.crouzet.com)
- [http:// www.barmex.com.mx](http://www.barmex.com.mx)