



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MICROSCOPIO  
DE EFECTO TUNEL PARA EL ESTUDIO DE  
DEFORMACIONES MECANICAS Y FRACTURA  
EN MATERIALES**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
AREA ELECTRICA ELECTRONICA  
**P R E S E N T A N :**  
**MINERVA RUTH HERRERA RODRIGUEZ**  
**FRANCISCO ROSALES ROMERO**



**DIRECTOR: DR. GUILLERMO PULOS CARDENAS**  
**CODIRECTOR: ING. RODOLFO PETERS LAMMEL**

**MEXICO, D. F.**

**SEPTIEMBRE 1997**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

*"Por un ideal se vive, se ama,  
se lucha, se triunfa"  
(Andrés Bello).*

*Pero un ideal no es el resultado del sueño de una sola persona y atrás del desvelo del que lo persigue, otros desvelos existen; el de los padres, el de los hermanos, el de la familia, el de los amigos, en fin, el de todos aquéllos que quieren vernos felices y nos ayudan con su luz a cruzar la oscuridad.*

*Hoy al escribir estas líneas aprovecho para agradecer a todos ellos, quienes con su presencia han dado sentido y alegría a mi vida y al dedicarme su tiempo me han obsequiado con el mejor regalo que puede darle un ser humano a otro.*

*"... Si la vida se sostiene por instantes  
y el instante es el momento de existir,  
si tu vida es otro instante no comprendo ...  
tantos siglos, tantos mundos, tanto espacio  
y coincidir"  
(Mexicanito)*

*A mi madre, por tu fuerza, amor y espíritu de lucha y porque a pesar de la lejanía de tus pensamientos siempre has estado conmigo.*

*A mi hermana, por tu ejemplo, amor, confianza, apoyo y paciencia.*

*A mi tía Yolanda y en memoria de mi tío Antonio, porque sin ustedes la vida no habría sido la misma.*

*A Norma, mi prima, porque apareces como las cometas y me obsequias siempre una experiencia de vida.*

*A mis sobrinos Krystal y Tonatiuh, porque ustedes comparten conmigo sus juegos y alegrías además de obsequiarme con la hermosa inocencia de su amor.*

*"...En el borde del camino hay una silla  
la rapiña merodea aquel lugar.  
La casaca del amigo está tendida  
el amigo no se sienta a descansar"  
(Silvio Rodríguez)*

*A mis amigos, principalmente a Carlos, Lety, Octavio, Ana, Ale, Carmen, Mauricio y Laura. Por las experiencias que hemos compartido, por los momentos de reflexión siempre bienvenidos, por sus enseñanzas, por lo que significa crecer juntos, por los poemas y las canciones, por lo humanizante que es estar junto a ustedes, por los recuerdos, por su apoyo y su confianza.*

*"El hombre instruido tiene siempre  
las riquezas en sí mismo"  
(Fedro)*

*A mis maestros, por su dedicación y entrega, por su guía, paciencia y confianza.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de acceder al conocimiento sin importar cuanto dinero llevase yo en mi bolsillo. ¡Viva la Universidad Pública!*

*"... Soy vecino de este mundo  
por un rato y hoy coincide  
que también tu estas aquí..."  
(Mexicanto)*

*A todos los que a mi memoria escapan y bajo cuya luz alguna vez camine.*

**M. R. H. R.**

*A mis padres, Angela y Agustín, que jamás durmieron cuando yo no lo hice (y muchas veces más) y que siempre estuvieron conmigo cuando, por fuerza, yo no estuve con ellos.*

*"Hush now don't cry  
Wipe away the teardrop from your eye  
Your lying safe in bed  
It was all a bad dream  
Spinning in your head ..."*

*A mi esposa Chuy de quien no sólo recibí todo el apoyo, sino que me quedé con él.*

*"... I guess it was bad 'cause love can be sad ...  
You're all I need Make you only mine ..."*

*A mis hermanos May y Car, amigos y cómplices, que siempre me animaron y obligaron a llegar hasta aquí,*

*" Open your bag of secrets...  
Here, in... the Waiting hour ... "*

*A la memoria de mis abuelos Francisca, Herculano y Agustín; y a mi abuelita Agripina por enseñarme mi origen y la fuerza del trabajo; gracias por apartarme de vivir "... en la vulgar falta de identidad ".*

*A los mejores amigos que se puede tener Bety, Miguel, Gilda, Viviana, Raúl, Polo y mi tía Estela; gracias por compartir conmigo, por pensar distinto y por sentir igual.*

*" Para no hacer de mi ícono pedacitos  
Para salvarme entre únicos e impares ...  
... Yo me muero como viví "*

*Al Dr. Guillermo Pulas por su paciencia y respaldo en todo momento.*

*A Ruth por ayudarme a finalizar este trabajo; gracias por tu amistad.*

*A todos aquellos que escapan de mi mente y que de alguna forma contribuyeron a mi formación como persona y como estudiante.*

*Francisco.*

*"Nada vale la ciencia si no se convierte en conciencia"  
(C. Dassi).*

*Al Dr. Guillermo Pulas C. Por la guía y el apoyo que nos brindaste en la realización de esta tesis, por tu confianza en nuestras habilidades y por tu paciencia al momento de explicar y de aceptar nuestros errores. Por la libertad con que nos permite trabajar.*

*Al Ing. Rodolfo Peters L. Por tu apoyo, paciencia y, por las palabras clave acompañadas de algunos minutos de filosofía.*

*Al Ing. Francisco Rodríguez por tus consejos en los momentos de difícil decisión, por tu apoyo y tu guía siempre realista.*

*Al Ing. Gabriel Jaramillo M. Por el amor, la dedicación y empeño con que enseñas. Gracias por tu ejemplo*

*Al Ing Roberto Mandujano W. Por ser uno de los profesores, cada vez más escasos, que se interesan por el desarrollo integral de sus alumnos.*

*Al Dr. Enrique Geffroy por dejarnos invadir su laboratorio, por soportar nuestro desorden e invitarnos al orden, por prestarnos el equipo de trabajo y, por las repentinas charlas cargadas de experiencia.*

*Al personal del taller del IIM, principalmente al Sr. Ismael López G. Por su ayuda y colaboración y, por su sonrisa alegre de cada mañana. ¿Dónde están las maduras?*

*A Patricia Rodríguez D. Por tu amistad, apoyo y alegría contagiosa, y... por mucho más.*

*A Octavio, nuevamente. ¿Qué habría sido de esta tesis sin un lugar donde imprimirla? Gracias por todo.*

*A Francisco, porque a pesar de que caminamos a diferente ritmo...caminamos.*

*Al Instituto de Investigaciones en Materiales por el apoyo en la realización de este proyecto.*

*Ruth, Francisco.*

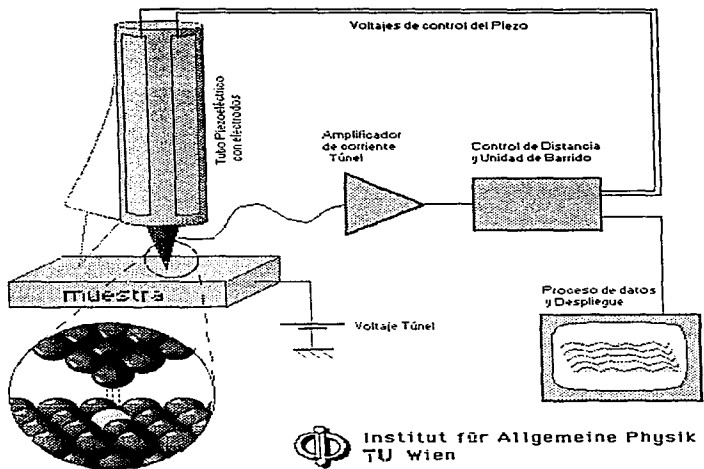
# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
1. 1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	3
1. 2 FUNCIONAMIENTO.....	5
1.2.1 <i>Modos de operación</i> .....	6
a) Modo de operación a corriente constante.....	6
b) Modo de operación a altura constante.....	6
1.2.2 <i>Presentación de los datos</i> .....	7
<b>DISEÑO</b> .....	<b>9</b>
2.1 CONVERTIDOR DE CORRIENTE A VOLTAJE.....	9
2.1.1 <i>Convertidor</i> .....	9
2.1.2 <i>Amplificación</i> .....	13
2.2 ETAPA DIGITAL.....	13
2.2.1 <i>Procesador Digital de Señales</i> .....	14
2.2.2 <i>Convertidores A/D y D/A</i> .....	15
a) Convertidor A/D.....	16
b) Convertidor D/A.....	17
2.3 COMUNICACIÓN CON LA PC.....	18
2.3.1 <i>Transferencia de datos</i> .....	18
2.3.1 <i>Kernel de comunicación</i> .....	19
2.4 DISPOSITIVO DE BARRIDO.....	19
2.4.1 <i>Movimiento en la dirección z</i> .....	20
2.4.2 <i>Movimiento en el plano xy</i> .....	20
2.4.3 <i>Selección del tubo piezoeléctrico</i> .....	21
a) Ecuaciones de diseño.....	22
2. 5 ALTO VOLTAJE.....	24
2.5.1 <i>Amplificador operacional de potencia</i> .....	25
2.5.2 <i>Fuente de alto voltaje</i> .....	26
2.6. PROGRAMACIÓN.....	27
2.6.1 <i>Programa para la PC</i> .....	27
2.6.1 <i>Programa para el DSP</i> .....	29
2. 7 SOPORTE MECANICO.....	30
2. 8 PUNTA.....	31
<b>CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE</b> .....	<b>33</b>
3.1 CONVERTIDOR DE CORRIENTE A VOLTAJE.....	33
3.1.1 <i>Procedimiento de montaje</i> .....	33
3.1.2 <i>Problemas</i> .....	34
3.1.3 <i>Solución</i> .....	34
3.2 ETAPA DIGITAL Y DE COMUNICACION.....	35
3.3 DISPOSITIVO DE BARRIDO (ACTUADOR).....	35

3.4 ALTO VOLTAJE.....	36
3.4.1 Procedimiento de montaje.....	36
3.4.2 Problemas.....	36
3.4.3 Solución.....	37
3.5 PROGRAMACIÓN.....	37
3.5.1 Programa de la PC.....	37
a) Comunicación con la tarjeta DSK y carga del programa del DSP.....	38
b) Reconocimiento del momento en que se encuentra en túnel la punta del microscopio.....	38
c) Recepción de los datos provenientes de la corrección realizada.....	38
d) Almacenamiento de los datos en formato binario.....	38
e) Despliegue de la imagen.....	38
f) Cambio de parámetros de operación del microscopio.....	38
3.5.2 Programa para el DSP.....	38
a) Acercamiento.....	38
b) Lectura.....	39
c) Logaritmo.....	39
d) Control.....	39
e) Transmisión.....	40
f) Espera con control.....	40
g) Generación de rampas de barrido.....	40
3.7 SOPORTE MECÁNICO.....	41
3.8 PUNTA.....	41
<b>CALIBRACIÓN Y RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
4.1 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN.....	43
4.2 CONDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN.....	43
4.3 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN.....	44
4.3.1 Frecuencia de adquisición.....	45
4.3.2 Constantes de control.....	45
4.3.3 Corriente de referencia, voltaje de polarización y frecuencia de control.....	46
a) Corriente de referencia.....	46
b) Voltaje de polarización.....	46
c) Frecuencia de control.....	46
4.4 RESULTADOS.....	47
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
5.1 DE PROYECTO.....	50
5.2 DE TESIS.....	52
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>53</b>
APÉNDICE A1.....	53
APÉNDICE A2.....	54
APÉNDICE A3.....	55
APÉNDICE A4.....	56
APÉNDICE A4.....	57



<b>APÉNDICE B.....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>65</b>



## INTRODUCCIÓN

*"Hacer una tesis significa divertirse y la tesis es como el cerdo, en ella todo se aprovecha"*  
(U. Eco).

El estudiar la materia ha sido una de las grandes preocupaciones de los seres humanos, ésta ha llamado su atención en cuanto a su constitución, las leyes que la gobiernan, su conjunción en diferentes materiales, la creación de materiales sintéticos y el comportamiento de los mismos. Para resolver sus inquietudes el hombre ha creado una serie de protocolos con el fin de guiar su investigación y ha hecho del estudio de los materiales una ciencia. Hoy en día existen numerosos grupos, asociaciones y organismos que se dedican al estudio de los materiales. Uno de ellos es el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. En este Instituto se realizan estudios en materiales cerámicos, metálicos y poliméricos entre otros. Esta investigación no sólo se lleva a cabo con técnicas y tecnologías extranjeras sino también con tecnología que se desarrolla en el mismo Instituto, resultado de ello es el tema de la presente tesis. Este trabajo tiene como objetivo diseñar un microscopio de efecto túnel, conocido por sus siglas en inglés como STM (Scanning Tunneling Microscope), que sea útil, en un futuro, en el estudio de fractura y deformación en materiales; el desarrollo de este dispositivo forma parte del proyecto Deformación y Fractura de Materiales del Departamento de Polímeros.

Anteriormente el estudio de fractura en materiales se realizaba únicamente desde el punto de vista macroscópico pero, actualmente, a esta metodología se ha agregado el estudio microscópico de dichos procesos, constituyendo lo que se conoce como micromecánica.

El estudio microscópico permite el análisis de fenómenos no lineales en materiales que son sometidos a esfuerzos, lo cual no se puede llevar a cabo cuando se realizan estudios a nivel macroscópico en donde los procesos frecuentemente parecen lineales. Para llevar a cabo la investigación en esta zona no lineal se requiere de un instrumento que nos permita obtener una resolución de 0.05 ó 0.1 micras y desplazamientos de 10 a 50 micras<sup>1</sup>, ya que la

---

<sup>1</sup> 1 micra = 10<sup>-6</sup> m

interfase o zona de proceso presenta aproximadamente estas dimensiones, es por ello que el solo uso de un microscopio óptico convencional no basta y es necesario el empleo de otras técnicas. Una opción es la Microscopía de Efecto Túnel, con esta técnica se puede obtener resolución atómica y con un diseño adecuado es posible cubrir superficies de decenas de micras cuadradas.

Para estudios de deformación y fractura, se desea utilizar el microscopio de efecto túnel de tal forma que actúe como un "zoom" del microscopio óptico; esto es, que el STM trabaje en áreas en las que todavía es factible el empleo de un microscopio óptico pero que, de acuerdo a sus características, nos permita una mejor resolución en la zona de interés.

El diseño que se propone para el microscopio se basa en:

- a) el área que se pretende barrer
- b) la flexibilidad que se espera del microscopio para efectos de calibración y para modificaciones posteriores.

Para cubrir estos puntos hay que seleccionar cuidadosamente el material que realiza los desplazamientos sobre la superficie de la muestra y para obtener la flexibilidad requerida se hace uso de un Procesador Digital de Señales, conocido por sus siglas en inglés como DSP (Digital Signal Processor), éste permitirá variar los parámetros del microscopio, que así lo requieran, a través de su programación.

El presente trabajo escrito está dividido en cinco capítulos correspondientes a las fases de realización del proyecto. En el primer capítulo se presenta brevemente el origen del microscopio, el principio de operación con el que trabaja y, de manera muy general, como funciona; en el segundo capítulo, cada elemento del microscopio se estudia de manera más detallada presentándose las ecuaciones y criterios de diseño; en el capítulo tres, se hace referencia al proceso de montaje de los subsistemas en que se divide el STM y a las modificaciones efectuadas sobre el diseño para su funcionamiento; en el capítulo cuatro, se describe el proceso de calibración del microscopio; y en el último capítulo se encuentran las conclusiones generales y de resultados del proyecto. Además el presente trabajo contiene una sección de apéndices con que se complementa la información del texto.

## Capítulo 1

# ANTECEDENTES

*"Hoy por hoy no sólo no poseemos ningún modelo perfecto [del átomo] sino que sabemos que es inútil buscarlo..."*  
(Sir James Jean, 1942).

El desarrollo de la microscopía de efecto túnel se inicia con los trabajos de G. Binnig, H. Rohrer, Chen. Gerber E. Weibel y sus colaboradores [1] en los laboratorios IBM en Zürich a principios de la década de los 80. Desde entonces se le han hecho grandes modificaciones al diseño original con el fin de mejorar su desempeño y ampliar sus áreas de operación; así, actualmente no sólo se emplea para estudiar átomos, también se aplica en estudios de biología molecular, síntesis química e ingeniería de materiales.

### 1. 1 Principio de operación.

El principio de operación del STM es un fenómeno de la teoría de mecánica cuántica denominado efecto túnel. El efecto túnel se manifiesta como la probabilidad de que un electrón pase de una región a otra a través de una barrera de potencial; la probabilidad de que el electrón cruce dicha barrera depende del ancho de la misma.

En el microscopio de efecto túnel las dos regiones antes mencionadas son dos superficies conductoras y la barrera de potencial es el espacio existente entre ellas. A este arreglo se le conoce como unión túnel metal-vacío-metal y al flujo de electrones que se verifica a través de la unión túnel se le conoce como corriente túnel  $I_t$  (v. figura 1.1). Dicha corriente es la señal de interés en el funcionamiento del microscopio y se relaciona con la barrera de potencial mediante la ecuación (1.1) [2].

$$I_t \propto \frac{V}{d} e^{(-4e\phi/d)} \quad (1.1)$$

donde:  $d$  = distancia entre la punta y la muestra [Å]<sup>1</sup>.

$A$  = constante  $1.025 [(eV)^{1/2} \text{Å}^{-1}]$ .

$\phi$  = función de trabajo<sup>2</sup> entre la punta y la muestra [eV].

Para aplicar la ecuación (1.1) se debe cumplir:

- que el voltaje de polarización<sup>3</sup> sea menor a  $\pm 5V$  y
- que la distancia entre la punta y la muestra sea pequeña, es decir, que se encuentre dentro de la región túnel<sup>4</sup>.

De la ecuación (1.1) se puede ver que, si  $\phi = 4eV$  y la distancia  $d$  entre la punta y la muestra disminuye  $1\text{Å}$ , la corriente túnel se incrementa aproximadamente en un orden de magnitud. Lo anterior pone de manifiesto:

- La alta resolución que se puede obtener con el STM y
- la susceptibilidad del microscopio al ruido y a las vibraciones mecánicas.

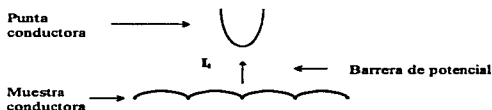


Figura 1.1 Unión metal - vacío-metal (unión túnel).

<sup>1</sup>  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$

<sup>2</sup> La función de trabajo de una superficie metálica se define como el valor mínimo de energía requerido para separar un electrón de la misma

<sup>3</sup> Si el voltaje es mayor a  $\pm 5 \text{ V}$ , se opera en régimen de emisión de campo. En este caso  $I_t$  está dada por:

$$I = e \int \nu^2 \left\{ (e^{-eV/\nu}) \exp\left[-\frac{2A}{\nu} \sqrt{\phi - eV/\nu}\right] - (e^{+eV/\nu}) \exp\left[-\frac{2A}{\nu} \sqrt{\phi + eV/\nu}\right] \right\} \nu^2 d\nu$$

<sup>4</sup> La región túnel es la distancia entre la punta y la muestra (aproximadamente  $10\text{Å}$ ) a la cual es prácticamente posible medir la corriente túnel.

En la tabla 1.1 se muestran los valores típicos de  $\phi$  de los materiales comúnmente empleados en el microscopio de efecto túnel.

Elemento	Al	Au	Cu	Ir	Ni	Pt	Si	W
$\phi$ [eV]	4.1	5.4	4.6	5.6	5.2	5.7	4.8	4.8

Tabla 1.1 Valores típicos de la función de trabajo.

## 1.2 Funcionamiento.

De manera general se puede decir que el STM está integrado por los siguientes elementos: unión túnel, convertidor de corriente a voltaje, lazo de realimentación,<sup>3</sup> elemento de barrido o actuador, sistema de adquisición de la imagen y soporte mecánico. En la figura 1.2 se muestra la interrelación de algunos de estos componentes los cuales, junto con otros, se presentarán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

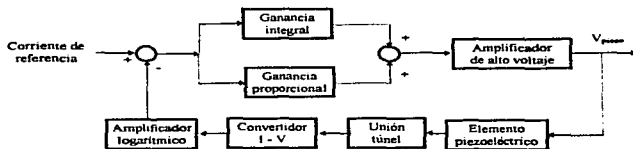


Figura 1.2 Diagrama a bloques del sistema de realimentación para el control del microscopio de efecto túnel.

<sup>3</sup> Sólo en caso de trabajar en el modo de operación a corriente constante.

### 1.2.1 Modos de operación.

Con el microscopio de efecto túnel se puede trabajar principalmente en dos modos de operación [3]: a corriente constante y a altura constante. En ambos casos una superficie conductora llamada punta, unida a un elemento actuador se posiciona a cierta distancia  $d_0$  de otra superficie, también conductora, llamada muestra. Al aplicar una diferencia de potencial entre estas superficies se genera un flujo de corriente  $I$ , dado por la ecuación (1.1).

#### a) Modo de operación a corriente constante.

Cuando se trabaja en el modo de corriente constante,  $I$ , se compara con un valor de referencia  $I_0$ . La diferencia de corriente entre dos puntos es una medida directa de la diferencia de altura entre los mismos, y esta diferencia de alturas la corrección requerida por el actuador para lograr la condición de equilibrio  $I = I_0$ ; esta señal de corrección se aplica al actuador en la dirección  $z$  de tal forma que si la corriente túnel es mayor que el valor de referencia entonces la señal aplicada al actuador hace que la punta se aleje de la muestra, y viceversa (v. figura. 1.3). Es así como se establece un equilibrio en la posición  $z$  a través del lazo de control y de esta manera, mientras la punta se desplaza en el plano  $xy$ , se obtiene y almacena un arreglo bidimensional de la corrección en  $z$ , que representa la topografía de la superficie a cierta corriente  $I$ , constante.

#### b) Modo de operación a altura constante.

Cuando se opera el microscopio a altura constante, se elimina el lazo de control y la imagen se obtiene al registrar las variaciones de corriente que se presentan conforme la punta se desplaza en las direcciones  $x$  e  $y$ .

Cada modo de operación tiene sus propias ventajas. Por un lado, el modo de corriente constante es preferible en el estudio de superficies que no son atómicamente planas. Por otro, el modo de altura constante permite obtener imágenes a mayor velocidad de superficies atómicamente planas, ya que sólo la electrónica, sin el actuador, debe responder a las variaciones en corriente producidas por la topografía de la muestra; una



adecuada velocidad de barrido no sólo permite el estudio de procesos en tiempo real y disminuye el tiempo de adquisición de la imagen, también reduce las distorsiones en ésta debidas al actuador.

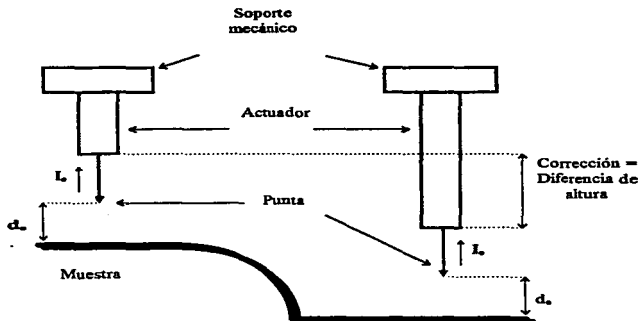
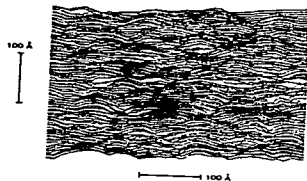


Figura 1.3 Modo de operación a corriente constante. Corrección en la posición del actuador debida al lazo de control.

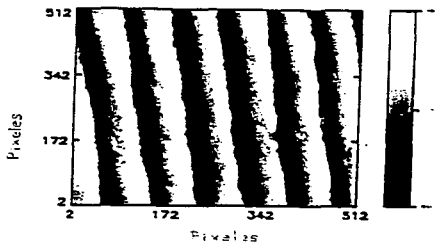
### 1.2.2 Presentación de los datos.

En ambos métodos de operación se obtienen una serie de datos con los que se crea una imagen tridimensional ( $z=f(x, y)$ ) de la superficie bajo estudio. La imagen se despliega en la pantalla de una computadora, ya sea como una serie de líneas de barrido o como una imagen en escala de color. Las líneas de barrido son una secuencia de curvas, cada una de las cuales representa el contorno en la dirección  $x$  manteniendo  $y$  constante; las curvas con diferentes  $y$ 's son desplazadas verticalmente. En la imagen en escala de color, los puntos más claros

pueden representar alturas mayores o menores en  $z$  según se elija en la tabla de color (v. figura. 1.4).



(a)



(b)

Figura 1.4 Imagen tridimensional. a) como líneas de barrido b) en escala de color.

## Capítulo 2

# DISEÑO

*"La luz no hace más que alumbrar el camino,  
pero no da a los hombres fuerza para recorrerlo"  
(Benjamin Constant).*

En la fase de diseño el microscopio de efecto túnel se dividió en los siguientes subsistemas:

- Convertidor de corriente a voltaje.
- Etapa digital
- Comunicación con la PC.
- Dispositivo de barrido (actuador).
- Alto voltaje.
- Programación.
- Soporte mecánico.
- Punta.

### 2.1 Convertidor de corriente a voltaje.

El convertidor de corriente a voltaje se compone de dos secciones: la de conversión, propiamente dicha, y la de amplificación que sirve para acondicionar la señal.

#### 2.1.1 Convertidor.

Las características deseables del amplificador operacional que realiza la conversión de corriente a voltaje son [4]:

- a) La corriente de polarización  $I_b$  pequeña.
- b) Bajo nivel de ruido a la entrada  $I_n$ ,  $v_n$ .
- c) Ancho de banda aceptable.

Las dos primeras características se requieren para trabajar con la corriente túnel que varía típicamente de 0.01 nA a 50 nA [2] y la tercera con la velocidad de respuesta del sistema. En la bibliografía se encontraron dos amplificadores que cumplen con estas características: el OPA128LM de Burr Brown y el AD549L de Analog Devices. Las características de estos dispositivos se muestran en la tabla 2.1.

Producto	$I_s$ [EA] <sup>1</sup>	$i_{ns}$ $\frac{f_n}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$e_{ns}$ $\frac{nV}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$f_T$ [MHz]
OPA128LM	75	0.12	92	0.5
AD459L	60	0.11	90	0.7

Tabla 2.1 Amplificadores operacionales recomendados para obtener la corriente túnel.

De estos amplificadores se eligió el OPA128LM por tiempo de entrega y costo. En la figura 2.1 se muestra la configuración básica del amplificador operacional como convertidor de corriente a voltaje.

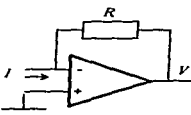


Figura 2.1 Convertidor de corriente a voltaje.

La relación entre la entrada y la salida del circuito que se muestra en la figura 2.1 está determinada por la ecuación

$$V = IR, \quad (2.1)$$

<sup>1</sup> EA = femto amperos = 10<sup>-15</sup> A.

donde:  $V$  = voltaje de salida [V]

$I$  = corriente de entrada [A]

$R$  = resistencia de realimentación [ $\Omega$ ]

Principalmente dos tipos de ruido se encuentran asociados a un amplificador operacional [5]:

- a) Ruido *térmico*, también llamado ruido *Johnson*, éste se produce por el movimiento de los electrones a través de la resistencia de realimentación

$$V_{th} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.2)$$

donde:  $V_{th}$  = voltaje de ruido térmico [V]

$k$  = constante de Boltzman  $1.38 \times 10^{-23}$  [J/K]

$T$  = temperatura absoluta [K]

$\Delta f$  = ancho de banda [Hz]

$R$  = resistencia de realimentación [ $\Omega$ ];

al despejar la ecuación, la corriente de ruido térmico queda definida por

$$I_{th} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad (2.3)$$

- b) Ruido *Schottky* o *shot* debido a la naturaleza discreta de la corriente

$$V_{shot} = R\sqrt{2Ie\Delta f} \quad (2.4)$$

donde:  $V_{shot}$  = Voltaje de ruido shot [V]

$e$  = Carga del electrón  $1.6 \times 10^{-19}$  [C]

$I$  = Corriente promedio [A]

$R$  = resistencia de realimentación [ $\Omega$ ]

y la corriente de ruido shot  $I_{shot}$  queda definido por la siguiente ecuación

$$I_{shot} = \sqrt{2I_e\Delta f} \quad (2.5)$$

Partiendo de la ecuación (2.3) resulta obvio que al aumentar  $R$ , el ruido térmico en corriente disminuye, mientras que en la ecuación (2.5) se puede observar que el ruido shot en corriente depende de la corriente promedio de trabajo y del ancho de banda, pero no de la resistencia de realimentación: ello permite tomar una referencia para seleccionar el valor de  $R$ . Así  $R$  se calcula de manera que  $V_{th} < V_{shot}$ , lo que implica que a temperatura ambiente  $R > 50 \text{ mV}/I$ . Tomando en cuenta lo anterior y el valor de  $I$ , a manejar,  $R$  está comprendida en el intervalo de 1 a 1000  $\text{M}\Omega$ .

Como ya se mencionó, otra característica importante del convertidor es el ancho de banda. Para conocer la respuesta en frecuencia, primero se analizan los efectos de la capacitancia parásita que se encuentra en paralelo con  $R$  (v. figura 2.2). Al considerar una corriente sinusoidal de entrada de frecuencia  $f$ , se tiene que la magnitud del voltaje de salida está dada por [13].

$$|V| = \frac{IR}{\sqrt{1+(2\pi fRC_p)^2}}, \quad (2.6)$$

donde:  $C_p$  = Capacitancia parásita [F]  
al despejar,  $f$  es igual a

$$f = \frac{1}{2\pi RC_p}. \quad (2.7)$$

Tomando en cuenta que aun en un diseño cuidadoso del circuito impreso hay una  $C_p$  mínima de 0.5 pF [13], para un valor de resistencia de 100  $\text{M}\Omega$  se estima una frecuencia de corte de 3 kHz, mientras que para  $R$  igual a 1000  $\text{M}\Omega$  una de 300 Hz. Así, haciendo un balance entre la relación señal-ruido, el ancho de banda y la disponibilidad en el mercado de

estos valores de resistencias, se decidió manejar resistencias de  $100\text{ M}\Omega$ . Es recomendable que esta resistencia sea de película metálica para que el nivel de ruido sea mínimo.

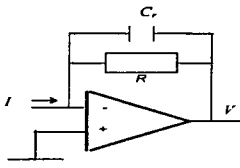


Figura 2.2 Convertidor de corriente a voltaje con capacitancia parásita  $C_p$ .

### 2.1.2 Amplificación.

Con este valor de resistencia se tienen  $100\text{ mV/nA}$ . Para obtener un volt por nanoamperio se añade una etapa de amplificación. Esto se hizo con un amplificador de instrumentación, el INA110KP de Burr Brown. Se utilizó este dispositivo por su alta velocidad, baja corriente de polarización, buena relación señal-ruido y el hecho de que no utiliza resistencias externas para el ajuste de la ganancia por lo que no aumenta el ruido térmico. Las ganancias que maneja son: 1, 10, 100, 200 y 500. Para trabajar con un volt por nanoamperio el circuito se alambra de manera que genere una ganancia de 10.

### 2.2 Etapa Digital.

La etapa digital del microscopio está compuesta por:

- Un Procesador Digital de Señales,
- un convertidor analógico-digital,
- un convertidor digital-analógico y
- una computadora personal PC.

## 2.2.1 Procesador Digital de Señales.

El DSP que se utiliza es el TMS320C50 de Texas Instruments. Este dispositivo se encuentra incluido en una tarjeta DSK (DSP Starter Kit) que presenta, entre otras, las siguientes características:

- a) Un procesador TMS320C50.
- b) Comunicación serial del procesador a los convertidores ADC/DAC de 14 bits por medio de un AIC (Analog Interface Circuit).
- c) Comunicación serial con la computadora a través de una interfaz RS232.
- d) *Kernel* de comunicaciones que permite la carga y la ejecución de programas.
- e) Trabaja en modo *Stand Alone* o paso a paso para la depuración de las aplicaciones.

El TMS320C50 es un DSP de punto fijo de 16 bits, su arquitectura es de tipo *Harvard* con algunas modificaciones sobre las líneas de datos y de programa, que hacen más sencilla la tarea cuando se trata de expandir la memoria de cualquiera de estas secciones o al incluir puertos de entrada o salida.

Funciona con base en un *Pipe line* lo que permite realizar instrucciones en diferentes etapas simultáneamente, reduciendo el tiempo de ejecución por instrucción a un solo ciclo de reloj.

Otras características importantes del DSP son las siguientes:

- a) Tiempo de ejecución de 50 ns.
- b) RAM  $9k \times 16$  bits para programas y datos.
- c) RAM de acceso doble  $1056 \times 16$  bits.
- d) ALU (Arithmetic Logic Unit) de 32 bits.
- e) Tiene un acumulador buffer de 32 bits para almacenamiento temporal de datos.
- f) Tiene registros para puertos de entrada y salida que se encuentran en el mapa de memoria.
- g) Tiene un *Hardware Stack* de ocho niveles en que almacena el contador de programa durante interrupciones o llamadas a una subrutina.



- h) Presenta catorce fuentes de interrupción: seis externas asíncronas, cuatro mascarables y dos no mascarables; cinco internas síncronas al CPU: cuatro causadas por los puertos seriales y una por el timer. Además de tres interrupciones por software.
- i) Es de Tecnología CMOS estática de 5 V.

En la figura 2.3 se presenta la organización del procesador.

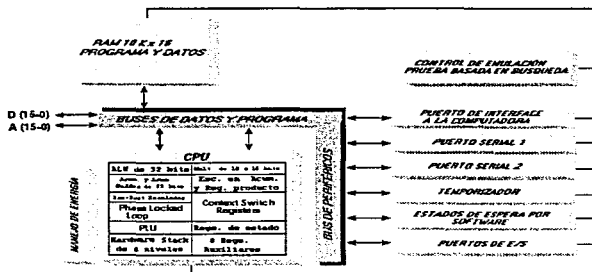


Figura 2.3 Procesador Digital de Señales TMS320C50

### 2.2.2 Convertidores A/D y D/A.

A pesar de que la tarjeta DSK cuenta con convertidores analógico-digital y digital-analógico, se consideró necesario sustituir estos periféricos de comunicación serial por unos de comunicación paralela, más velozes y con una escala mayor de voltaje (los convertidores de la tarjeta manejan voltajes de -3V y -3V). Las características generales de los convertidores seleccionados son:

- a) Tiempo de conversión pequeño.
- b) Intervalo de voltaje de entrada o salida amplio.

### c) Interfaz paralela.

#### a) Convertidor A/D.

El convertidor analógico - digital seleccionado es el ADS7810PB de Burr-Brown. Éste es un convertidor de aproximaciones sucesivas con una resolución de 12 bits en complemento a 2. El intervalo de entrada de voltaje va de  $-10$  a  $+10$  V y la frecuencia máxima de muestreo es de 800 kHz. Cuenta con interfaz completa para trabajar con un microprocesador, ya que utiliza señales lógicas que le indican inicio de conversión y lectura. El ADS7810PB, también, se adapta directamente al tiempo de transferencia de información con el DSP; esto se verifica ya que la señal de habilitación para la lectura requiere un mínimo de 40ns para activar la línea del convertidor, mientras que la línea externa del procesador realiza la lectura en 1 ciclo de reloj (50ns) activando un ciclo antes el puerto y desactivándolo un ciclo después. La palabra de 12 bits del convertidor se encuentra en la parte baja de la palabra del DSP, por lo que siempre los datos de conversión tienen el siguiente formato  $0XXX_{16}X$ . En la figura 2.4 se muestra el diagrama a bloques del convertidor.

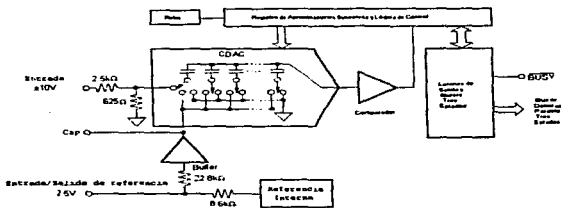


Figura 2.4 Convertidor Analógico-Digital ADS7810AP.

### b) Convertidor D/A.

Después de ser procesada la información por el DSP, la salida digital se convierte en señal analógica mediante un circuito DAC4813AP de Burr-Brown. El solo empleo de este convertidor permite obtener las señales de barrido y control generadas por el DSP.

El DAC4813AP contiene cuatro convertidores de 12 bits, cada uno con una salida de voltaje que puede variar entre  $\pm 10$  V. Una interfaz lógica integrada para la línea de datos, que permite el acceso independiente a cada uno de los canales a través de un doble latch, con la posibilidad de actualizar todos los canales simultáneamente después de haber cargado los valores correspondientes a cada uno en el primer buffer. El código de entrada del convertidor es de tipo BOB (Bipolar Offset Binary), lo cual significa que el valor más negativo de salida se tiene cuando el valor digital en la entrada es \$000 y el más positivo cuando es \$FFF. En la figura 2.5 se muestra el diagrama del convertidor.

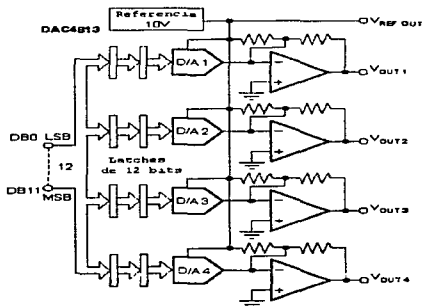


Figura 2.5 Convertidor Digital-Analógico DAC4813.

## 2.3 Comunicación con la PC.

La comunicación con la computadora es necesaria partiendo de las condiciones que presenta la tarjeta DSK. A pesar de que la tarjeta tiene la capacidad de operar en modo stand alone todos los programas deben cargarse desde una PC a través del puerto serial, ello debido a que en esta configuración el DSP carece de memoria no volátil para aplicaciones; por otro lado existe la necesidad de almacenar la información proveniente del DSP acerca de las características de la superficie que barre el microscopio.

Físicamente el procesador tiene dos puertos seriales, sin embargo se trata de puertos seriales síncronos; es por esto que, como ya se mencionó, la tarjeta incluye un "UART alambrado". La comunicación asíncrona se realiza a través de una terminal de interrupción no mascarable y una terminal de salida del DSP (v. Fig. 2.6).

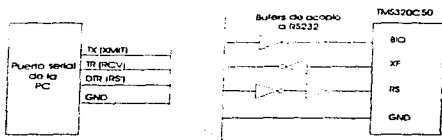


Figura 2.6 Interfaz serial PC-DSP

### 2.3.1 Transferencia de datos.

Aun cuando la comunicación es bidireccional, no existe una instrucción directa mediante la cual se pueda transmitir hacia la PC; por ello, para enviar el dato deseado, éste se carga en el acumulador y se efectúan corrimientos hacia el bit de acarreo; el valor así obtenido se envía a una salida básica de un bit CNF y de ahí a la computadora a través del buffer DM1489. La recepción se lleva a cabo con el buffer DM1488; éste se conecta a la terminal BIO del DSP.

### **2.3.1 Kernel de comunicación.**

El *kernel* de comunicación que incluye la tarjeta DSK opera en forma serial y permite recibir y enviar información, así como algunos comandos, para realizar tareas específicas. El empleo de una de las rutinas contenidas en él permite enviar los datos de la corrección de la posición de la punta del microscopio.

La tarjeta puede comunicarse con la computadora a una velocidad de 9600 a 115200 bits por segundo; en este caso se eligió como velocidad de transmisión 57600, debido principalmente a la restricción de utilizar un programa de recepción, en la PC, en modo de supervisión del puerto serial.

La tarjeta DSK incluye las siguientes utilidades:

- a) Ensamblador de código para el TMS320C50.
- b) Programa para cargar y correr aplicaciones.
- c) Depurador de programas con el cual se pueden observar registros y localidades de memoria del DSP.

Para lograr la comunicación con el DSP se utilizó una librería de funciones en la que se documentan los comandos que se envían, así como la manera y el formato en que han de transmitirse. Esta librería se encontró a través de Internet en el servidor FTP de Texas Instruments [6], se modificó y adaptó a nuestro programa y aplicación específica. Esta adaptación permitió que de manera independiente a las utilidades que incluye la tarjeta, se realizaran las funciones de transmisión y ejecución del programa, así como la recepción de datos y la modificación de parámetros de operación desde una computadora.

### **2.4 Dispositivo de barrido.**

Este elemento es el que mueve la punta sobre la muestra y controla la distancia entre las mismas. Para desplazarse en la superficie de la muestra cubriendo distancias tan pequeñas, el actuador debe tener las siguientes características [7]:

- a) Alta resolución para efectuar los pequeños desplazamientos requeridos.

- a) Alta resolución para efectuar los pequeños desplazamientos requeridos.
- b) Ortogonalidad, es decir, que el movimiento de cada uno de los ejes sea independiente.
- c) Linealidad, lo que implica que la cantidad de movimiento debe ser proporcional al voltaje aplicado.
- d) Rigidez mecánica, un actuador rígido tiene una frecuencia de resonancia alta, lo cual ayuda en el aislamiento contra vibraciones y en el desempeño del lazo de control.
- e) Un amplio rango de barrido para cubrir el área de interés en la muestra.

Actualmente este tipo de actuador se obtiene aprovechando el efecto piezoeléctrico que presentan algunos materiales. Estos tienen la propiedad de expandirse o contraerse al aplicárseles un campo eléctrico. La cerámica piezoeléctrica, conocida como PZT ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ) es la que comúnmente se utiliza en el STM y normalmente tienen la forma de un tubo cuyas superficies interna y externa están cubiertas de Níquel (v. figura 2.7a). Para realizar los barridos en el plano  $xy$ , el electrodo externo se divide en cuatro partes.

#### 2.4.1 Movimiento en la dirección $z$ .

Para mover el piezoeléctrico en el eje  $z$  se genera una diferencia de potencial entre el electrodo interno y el electrodo externo, esto hace que el tubo se expanda o se contraiga a lo largo de su eje. En la figura 2.7b muestra el movimiento en la dirección  $z$  del piezo.

#### 2.4.2 Movimiento en el plano $xy$ .

Con el electrodo externo dividido en cuadrantes se realizan los movimientos en las direcciones  $x$  o  $y$ . Para moverse únicamente en alguna de estas dos direcciones se aplican los voltajes  $+V$  y  $-V$  a segmentos opuestos mientras los otros electrodos se conectan a tierra. Al producirse los efectos de extensión en un cuadrante y contracción en el opuesto, debido a los voltajes aplicados, el tubo sufre una flexión que tiene la forma del arco de una circunferencia. En la figura 2.7c se presenta este comportamiento.

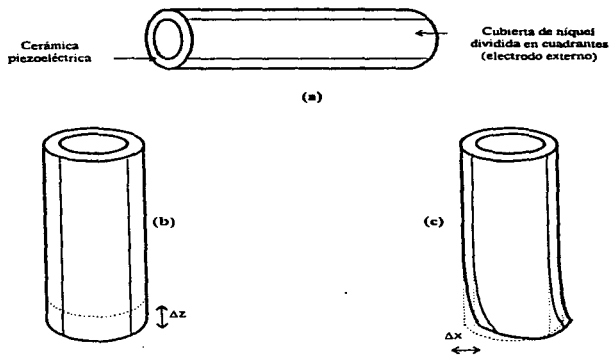


Figura 2.7 Tubo piezoeléctrico (a) Seccionado en cuadrantes (b) Desplazamiento en el eje  $z$  (c) Desplazamiento en el eje  $x$  o  $y$ .

### 2.4.3 Selección del tubo piezoeléctrico.

Al adquirir el tubo piezoeléctrico se deben tomar en cuenta dos aspectos:

- a) tipo de material y
- b) dimensiones del tubo.

Estos aspectos determinan la magnitud de los desplazamientos y la frecuencia de trabajo según se podrá constatar más adelante con las ecuaciones de diseño. En la tabla 2.2 se presentan las características de varios tubos piezoeléctricos EBL [8].

Material	EBL#1	EBL#2	EBL#3	EBL#4	EBL#9	EBL#16
$d_{31}$ A/V a 293 K	-1.27	-1.73	-2.62	-0.95	-1.35	-2.99
$d_{31}$ A/V a 293 K	2.95	3.81	5.83	2.20	3.15	8.02
$d_{31}$ A/V a 4.2 K	...	-0.31	-0.33	...	...	...
$d_{31}$ A/V a 4.2 K	...	0.69	0.74	...	...	...
Cte. dieléctrica $K'_t$	1 300	1 720	450	1 060	1 450	4 300
Campo despolarizador kV/cm rms AC	10	7	4	15	10	...
Módulo de Young $10^{10}$ N/m <sup>2</sup>	8.1	6.3	6.3	8.5	7.5	...
Temperatura Curie °C	320	350	190	300	320	195
Conductividad Térmica W/m°C	2.1	1.5	1.5	2.1	2.1	...
Coefficiente. de expansión térmico ppm/°C	...	...	4.7	3.0	...	...
Densidad g/cm <sup>3</sup>	7.5	7.5	7.45	7.5	7.6	7.82
Q mecánica <sup>1</sup>	400	100	65	960	600	70
Voltaje aplicado V/mm	700	600	400	800	...	...
Relación de Poisson	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	...
Tipo Industrial	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8	PZT-4D	...

Tabla 2.2 Características de los tubos piezoeléctricos EBL. Stavaley Sensors Inc

a) Ecuaciones de diseño.

Las ecuaciones de desplazamiento y capacitancia [9] son:

$$\Delta z = \frac{d_{31} V L}{t} \quad (2.8)$$

$$\Delta C_m = \frac{d_{31} d_m L'}{t} \quad (2.9)$$

$$\Delta z_s = \frac{0.9 d_{31} L Z^2}{d_m t} \quad (2.10)$$

<sup>1</sup> La Q mecánica y la histéresis guardan una relación inversamente proporcional.

<sup>2</sup> Estos valores de voltaje corresponden a una polarización de Vdc. Cuando se aplica voltaje de alterna Vac, éste no debe exceder la mitad del valor del voltaje establecida.



$$C_{ap} = \frac{2K_p^2 \epsilon_0 \pi L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (2.11)$$

en las cuales.

$L$  = Longitud del piezo [m]

$V$  = Voltaje de polarización [V]

$t$  = Ancho de la pared del piezo [m]

$D$  = Diámetro externo [m]

$d$  = Diámetro interno [m]

$d_m = (D + d)/2$  [m]

$\epsilon_0$  = Permitividad del vacío  $8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{C^2}{Nm^2} \right]$

$Cap$  = Capacitancia [F]

y las ecuaciones de frecuencia [8]:

$$f_s = \frac{c}{4L} \quad (2.12)$$

$$f_s = \frac{0.56Kc}{L^2} \quad (2.13)$$

La velocidad del sonido  $c$  y el radio de giro  $K$  quedan definidos por las siguientes ecuaciones

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (2.14)$$

$$K = (D^2 + d^2)^{1/2} / 8 \quad (2.15)$$

donde:  $Y$  = Módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = Densidad [Kg/m<sup>3</sup>]

Tomando en cuenta los datos proporcionados en la tabla y las ecuaciones de diseño se adquirieron los materiales EBL#3 y EBL#4. La elección del material EBL#3 corresponde a que éste presenta uno de los valores más altos de coeficiente piezoeléctrico, mientras que la del EBL#4 se debe a la baja histéresis que de él se espera de acuerdo con el valor de Q que presenta. En el presente trabajo, sólo se realizarán pruebas con el material EBL#3, sin embargo, posteriormente se pretenden efectuar estudios relativos a la histéresis. En la tabla 2.3 se muestran las dimensiones y parámetros de desempeño del piezoeléctrico que se utilizó en el microscopio.

Material	EBL#3
Dimensiones L, D, t [cm]	7.62, 0.635, 0.0762
Voltaje máximo $V_{dc}$ [V]	304.8
Desplazamiento x, z [ $\mu\text{m}$ ]	96.96, 7.86
Frecuencia x, z [kHz]	0.284, 3.046
Capacitancia [nF]	6.94

Tabla 2.3 Dimensiones y desempeño del tubo piezoeléctrico.

## 2.5 Alto Voltaje.

La etapa de alto voltaje está integrada por los amplificadores de alto voltaje y por la fuente de poder con la que éstos se polarizan. Las características deseables de los amplificadores de alto voltaje son:

- a) Un rango de polarización amplio y
- b) una alta velocidad de respuesta SR (del inglés *slew rate*).

El amplificador operacional PA85 de Apex cumple estas especificaciones [9,10] y en la tabla 2.4 se presentan algunas características de este amplificador. Cinco de estos

dispositivos se requieren para manejar el tubo piezoeléctrico, uno por cada cuadrante del electrodo externo para efectuar los barridos en el plano  $xy$  y otro conectado al electrodo interno para realizar los desplazamientos de control en el eje  $z$ .

Antes de pasar a la etapa de alto voltaje, parte de las señales de barrido provenientes del DSP se invierten con un amplificador operacional de uso general (el TL074). De esta forma se obtienen las cinco señales con las que habrá de operar el piezo. Figura 2.8.

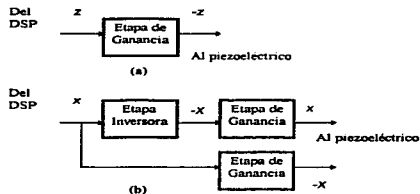


Figura 2.8 Tratamiento de las señales provenientes del DSP (a) Canal  $z$  (b) Canal  $x$  o  $y$

Producto	Rango de voltaje [V]	$f_T$ [MHz]	SR [V/ $\mu$ s]	$I_Q$ [mA]
PA85	15 - 225	110	1000	25

Tabla 2.4 Características del PA85

### 2.5.1 Amplificador operacional de potencia.

Cada PA85 se configura como un amplificador inversor con una ganancia de prueba en el rango de 2.8 a 5.6. Dado que el valor máximo de la señal de entrada al amplificador es de 20

$V_{pp}$ , la señal de ac con que se mueve el piezo se encuentran comprendida entre  $56 V_{pp}$  y  $112 V_{pp}$ <sup>3</sup>.

A continuación se presentan las ecuaciones de diseño para el manejo de cargas capacitivas [11].

Velocidad de respuesta  $SR$  [V/ $\mu$ s]

$$SR = 2\pi f V_{op} (1 \times 10^{-6}) \quad (2.16)$$

Cálculo de la reactancia capacitiva  $X_c$  [ $\Omega$ ] y de la corriente pico de salida  $I_{op}$  [A] a la mayor frecuencia de trabajo  $f$  [Hz]

$$X_c = \frac{1}{2\pi f CL} \quad (2.17)$$

$$I_{op} = \frac{V_{op}}{X_c} \quad (2.18)$$

donde:  $V_{op}$  = Voltaje pico de salida [V]

$CL$  = Carga capacitiva [F]

Una vez que se tiene  $I_{op}$ , el valor de la resistencia limitadora de corriente  $R_{CL}$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$R_{CL} = \frac{0.7}{I_{op} - 0.016} \quad (2.19)$$

## 2.5.2 Fuente de alto voltaje.

Para polarizar a los amplificadores de potencia, se modificó el diseño de una fuente cuya característica principal es que presenta bajo ruido y pocas variaciones de voltaje debidas a

---

<sup>3</sup> Véase nota 2 en la pág. 22.

cambios del mismo en la línea. La fuente puede entregar hasta +/-150 V y 150 mA. EL diagrama de la fuente se muestra en el apéndice A1.

## 2.6. Programación.

Debido a la interacción entre la tarjeta DSK y la computadora es necesario diseñar varias secciones de programación tanto para la computadora como para el DSP. Funcionalmente el procesador digital de señales se encarga de todas las acciones que debe llevar a cabo el microscopio; sin embargo, la computadora inicia la operación y almacena los datos obtenidos. Además, con ella se obtiene una representación gráfica de la información. En la figura 2.9 se muestra un diagrama a bloques del microscopio.

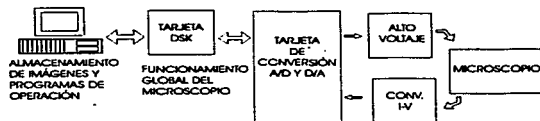


Figura 2.9 Diagrama a bloques del microscopio .

### 2.6.1 Programa para la PC.

El programa en la computadora lleva a cabo las siguientes rutinas:

- Comunicación con la tarjeta DSK y carga del programa del DSP.
- Reconocimiento del momento en que se encuentra en túnel la punta del microscopio.
- Recepción de los datos provenientes de la corrección realizada.
- Almacenamiento de los datos en formato binario.
- Despliegue de la imagen.
- Cambio de parámetros de operación del microscopio.

Este programa se diseñó con base en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 2.10.

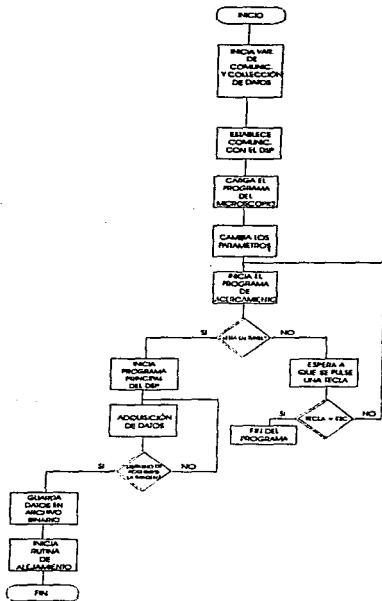


Figura 2.10 Diagrama de flujo del programa en la PC.

## 2.6.1 Programa para el DSP.

El Procesador Digital de Señales lleva a cabo las acciones principales para el funcionamiento del microscopio, estas son:

- Acercamiento de la punta a la muestra para entrar a región túnel.
- Lectura de la corriente túnel  $I_t$ .
- Obtención del logaritmo de la lectura anterior.

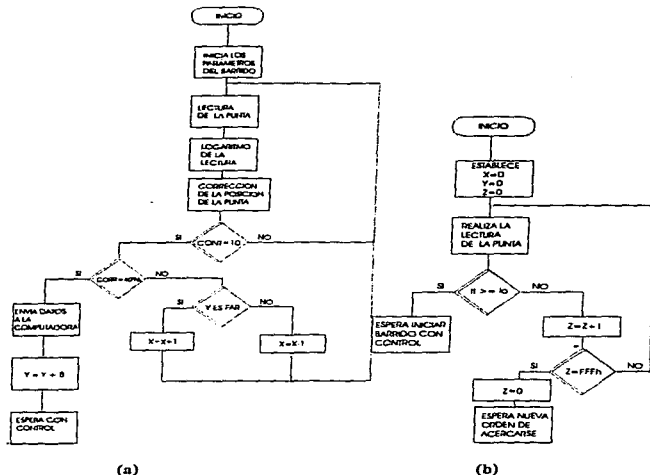


Figura 2.11 Diagramas de flujo de los programas del DSP. (a) Principal (b) Acercamiento.

- d) Corrección en la posición de la punta (salida en z).
- e) Generación de las señales de barrido en x e y.
- f) Transmisión de las correcciones a la computadora.

En la figura 2.11 se muestran los diagramas de flujo utilizados para la creación del programa del DSP y en el capítulo tres la forma en que se desarrollaron.

## 2. 7 Soporte mecánico.

El sistema mecánico del microscopio cumple dos funciones [7]:

- a) acercamiento y
- b) aislamiento de vibraciones externas.

El diseño debe hacerse de tal manera que permita alejar la punta de la muestra lo suficiente para cambiar esta última y después, aproximarse a la muestra para quedar dentro del rango de movimiento del piezo. El acercamiento debe hacerse en forma suave y predecible para evitar que la punta se impacte contra la muestra. Por otro lado, considerando la resolución y sensibilidad del STM, el problema de aislar al microscopio de vibraciones externas se debe tomar en cuenta. Es por ello que la estructura del microscopio tiene que ser rígida. A continuación se menciona, a grandes rasgos, cómo funciona el sistema que se diseñó para estos propósitos<sup>4</sup>.

El acercamiento mecánico de la punta a la muestra se realiza en dos etapas. La primera, a la que llamaremos acercamiento grueso, se lleva a cabo con un tornillo diferencial; con este tornillo se obtiene un desplazamiento aproximado de 105 $\mu$ m por vuelta. La segunda, a la que llamaremos acercamiento semifino, se efectúa con un tornillo y una viga; el tornillo guarda una relación de 80 vueltas/in (aproximadamente 31.5 vueltas/cm), lo cual en combinación con la viga y la posición en que se ubica la muestra sobre ella, nos permite realizar desplazamientos de 3.2 $\mu$ m por vuelta. En la figura 2.12 se muestra el arreglo.

---

<sup>4</sup> El diseño del sistema mecánico estuvo a cargo del Dr. Guillermo Pulos C. y del Ing. Ramón Martínez P.



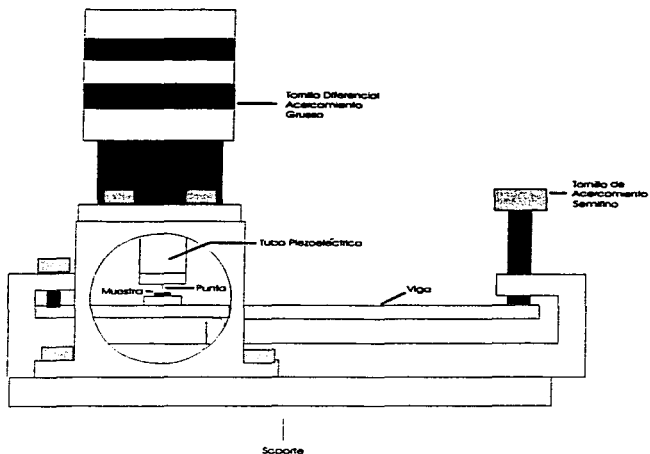


Figura 2.12 Estructura mecánica del microscopio.

## 2. 8 Punta.

La punta es un elemento crítico en la microscopía de efecto túnel debido a que su geometría y composición química influyen en las imágenes que se obtienen. La geometría de la punta es uno de los factores que determina la resolución del microscopio; puesto que en nuestra aplicación se requiere una resolución de 0.05 a 0.1 $\mu$ m, la punta a utilizar deberá tener aproximadamente estas dimensiones. Por otro lado, la superficie de la punta más próxima a la muestra debe ser perfectamente metálica, ya que de no ser así, la corriente túnel se puede

hacer inestable provocando que el control mueva la punta para compensar la falta de corriente túnel. Si la compensación es lo suficientemente grande puede ocurrir que la punta haga contacto con la muestra [7]

Cuando se trabaja en condiciones atmosféricas, el material más utilizado para hacer la punta es una aleación de Platino/Iridio (Pt/Ir), esto por su bajo costo (en comparación con la plata) y por el hecho de que no se oxida fácilmente (como es el caso del tungsteno). La punta se afila cortando el alambre con un ángulo aproximado de  $60^\circ$  con lo que es posible obtener una buena resolución [13].

### Capítulo 3

## CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

*"Al final ¿Cómo es esto?  
¿Uno lleva su vida por delante o la vida  
se lo lleva por delante a uno?"  
(Nafalada)*

Diseñado cada uno de los dispositivos que integran el microscopio se procedió a su construcción. Inicialmente los circuitos se montaron en tarjetas de prueba *protoboard* y una vez que se corroboró su funcionamiento, se procedió a elaborar el circuito impreso. En esta etapa se presentaron algunos problemas, principalmente con el convertidor de corriente a voltaje y con los amplificadores de alto voltaje.

### 3.1 Convertidor de corriente a voltaje.

#### **3.1.1 Procedimiento de montaje.**

- a) El dispositivo se montó en un circuito impreso de bajo ruido<sup>1</sup>
- b) Se colocó dentro de una caja de cobre de  $5 \times 3 \text{ cm}^2$  con conexión a tierra.<sup>2</sup>
- c) La caja se situó lo más cerca posible de la punta del microscopio para reducir, en la medida de lo posible, la inducción de ruido y para minimizar las capacitancias parásitas.
- d) El circuito es polarizado con una fuente de  $\pm 10 \text{ V}$ .
- e) La resistencia con que se construyó el circuito fue de película de carbón en lugar de la recomendada, de película metálica, debido a la dificultad para conseguir este valor de resistencia ( $100 \text{ M}\Omega$ ).

<sup>1</sup> Circuito impresos de doble cara, aterrizado completamente por la cara superior así como en la mayor parte de la cara inferior.

<sup>2</sup> Estas son las medidas de la cabeza del microscopio que es, la rosca interna del tornillo diferencial.

### 3.1.2 Problemas.

Bajo estas condiciones el circuito presentó oscilaciones a una frecuencia aproximada de 10 kHz.

### 3.1.3 Solución.

Para eliminar las oscilaciones se agregó un capacitor de compensación de 2.2 pF en paralelo con la resistencia de realimentación. Con este arreglo se obtuvieron las siguientes características de convertidor de corriente a voltaje:

- a) Frecuencia de corte 800 Hz (en forma práctica y 723.43 Hz según la ecuación 2.7).
- b) Ruido 4.5 mV.

En la figura 3.1 se muestra la señal que se obtuvo y en el apéndice A2, el diagrama de conexiones del circuito.

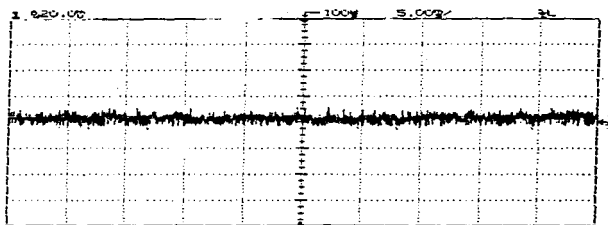


Figura 3.1 Señal del convertidor de corriente a voltaje.

### 3.2 Etapa Digital y de comunicación.

Una vez probados los convertidores se diseñó un circuito impreso y se montaron los componentes, en esta etapa no se presentó problema alguno. En el apéndice A3 se encuentra el diagrama de conexión de los convertidores.

En lo referente a la comunicación se encontró la frecuencia de transmisión que permitiera una adecuada comunicación entre la computadora y el DSP. La computadora que se utiliza es una PC 286.

### 3.3 Dispositivo de barrido (actuador).

El tubo piezoeléctrico se acondicionó para funcionar en el microscopio, lo que implicó, como ya se mencionó, dividir el electrodo exterior en cuadrantes. Además, con el fin de evitar problemas electromecánicos durante la expansión o contracción del piezo [13], se retiró el electrodo de los extremos del tubo. Dispuesto de esta manera, se pegó el piezoeléctrico, por uno de sus bordes a la cabeza del STM. Al electrodo interno así como a cada cuadrante del electrodo externo se le soldó un alambre magneto para polarizarlos [14].

Debido a la fragilidad de material piezoeléctrico, al acondicionarlo, se fracturó y con esto sus dimensiones se redujeron. En la tabla 3.1 se señalan las nuevas dimensiones del piezoeléctrico así como los desplazamientos que de él se esperan.

Material	EBL#3
Dimensiones L, D, t [cm]	7.67, 0.635, 0.0762
Voltaje máximo $V_{ac}$ [V]	304.8
Desplazamiento $x, z$ [ $\mu\text{m}$ ]	74.05, 6.88
Desplazamiento <sub>0.00V</sub> $x, z$ [ $\mu\text{m}$ ]	24.68, 2.29

Tabla 3.1 Dimensiones y desplazamientos del piezoeléctrico.

En forma práctica, se observó un desplazamiento en la dirección  $x$  ( $o y$ ) de  $10 \mu\text{m}$ , polarizando el piezoeléctrico en esta dirección con  $\pm 100\text{V}$ . La medición se realizó con ayuda de un microscopio óptico, una cámara fotográfica, un vernier y el paquete PV-WAVE. Con el microscopio óptico y la cámara se tomaron las imágenes de la punta del STM sin y con polarización, así como una imagen del vernier con una apertura de  $30\mu\text{m}$ . Con el paquete se encontró el valor en micras de cada pixel y de esta forma el desplazamiento en el piezoeléctrico. La discrepancia entre el valor teórico de desplazamiento y el obtenido puede deberse a que la lente que se empleó es de baja resolución  $5X$ ; se utilizó esta lente porque el empleo de una de mayor resolución requería un mayor acercamiento a la punta del STM, lo que resultaba difícil de realizar.

### **3.4 Alto voltaje.**

#### **3.4.1 Procedimiento de montaje.**

- a) Se elaboró un circuito impreso para cada amplificador operacional.
- b) Los amplificadores operacionales no se soldaron directamente a circuito, sino que se montaron a través de conectores.
- c) Cada amplificador se colocó en un disipador de calor.
- d) Se agregaron los componentes necesarios para la protección de los operacionales.

#### **3.4.2 Problemas.**

Dispuestos los circuitos de esta manera se probaron inicialmente por separado. En esta prueba no se presentó problema alguno, sin embargo, al conectar los cinco amplificadores simultáneamente el arreglo presentó oscilaciones; las oscilaciones tenían las siguientes características:

- a) No siempre se presentaban es decir, los circuitos podían o no oscilar.
- b) Su magnitud variaba entre  $5$  y  $12 \text{ V}$ .

c) La frecuencia de oscilación era del orden de MHz.

d) Se presentaban con o sin carga.

### **3.4.3 Solución.**

Con el objeto de eliminar las oscilaciones se llevaron a cabo las siguientes modificaciones:

- a) Se añadió un capacitor de 10 pF en paralelo con la resistencia de realimentación.
- b) El cable de salida de cada uno de los operacionales se hizo pasar a través de una ferrita [15].
- c) Se agregó un arreglo resistivo-capacitivo en serie a la entrada de cada amplificador.

Con las dos primeras modificaciones se eliminaron las oscilaciones de los operacionales sin carga, mientras que la tercera eliminó las oscilaciones bajo carga. Las características de los circuitos son:

- a) Frecuencia de corte promedio 134 kHz.
- b) Nivel de ruido promedio 50 mV.

La configuración final del circuito se encuentra en el apéndice A4.

## **3.5 Programación.**

### **3.5.1 Programa de la PC.**

En el capítulo anterior se mencionaron las funciones que realiza el programa de la PC. A continuación se describe la manera en que éstas se llevan a cabo.

**a) Comunicación con la tarjeta DSK y carga del programa del DSP.**

La computadora envía un dato de prueba y comprueba que el DSP esté funcionando. Una vez que esto se verifica, carga el programa y la tabla del logaritmo a través de una rutina de la librería principal.

**b) Reconocimiento del momento en que se encuentra en túnel la punta del microscopio.**

Una vez cargado el programa en el DSP, se inicia la rutina de acercamiento; el DSP transfiere a la computadora el dato \$00 mientras no entre en túnel y el dato \$FF una vez que el microscopio entra a región túnel.

**c) Recepción de los datos provenientes de la corrección realizada.**

Cuando la punta se encuentra en región túnel, se inicia la rutina principal del DSP (v. Fig. 2.10b). El DSP envía los datos de la corrección de barrido a la computadora; los datos se guardan temporalmente en un arreglo.

**d) Almacenamiento de los datos en formato binario.**

Cada 16 líneas, la información se guarda en el disco duro en código binario.

**e) Despliegue de la imagen.**

El despliegue de la imagen se hace en escala de color, en esta escala se cuenta con 256 tonos, los cuales se asignan tomando en cuenta los ocho bits más significativos del dato.<sup>3</sup>

**f) Cambio de parámetros de operación del microscopio.**

Esto se hace enviando una instrucción al DSP, el dato y su dirección en memoria.

### **3.5.2 Programa para el DSP.**

**a) Acercamiento.**

Al iniciar el acercamiento, el piezoeléctrico se encuentra semicontraído en la dirección  $z$  y en un extremo de la muestra. El valor de lectura en corriente  $I_z$  se compara con el valor de

---

<sup>3</sup> Posteriormente el análisis de las imágenes se haría con un programa de aplicación de uso comercial PV-WAVE.



referencia  $I_n$  y, dependiendo de si es mayor o menor que éste, manda un dato a la computadora indicando si entró o no a túnel.

**b) Lectura.**

El DSP activa al convertidor analógico - digital e inicia la lectura. Esto se hace por medio de uno de los puertos de salida del DSP.

**c) Logaritmo.**

Este se obtiene mediante una tabla LUT (del inglés Look Up Table). Al valor leído del convertidor se le suma la dirección inicial de la tabla (\$1000). El valor que hay en esa localidad de memoria corresponde al logaritmo de la corriente del valor leído. En la figura 3.2 se muestra el logaritmo de una función senoidal.

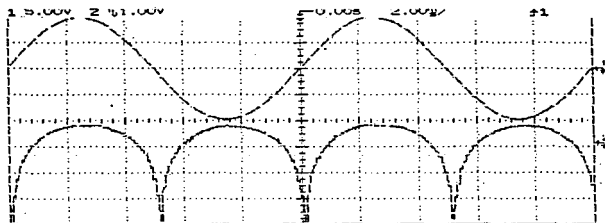


Figura 3.2 Logaritmo de una señal sinusoidal. Arriba se muestra la señal de entrada al DSP y abajo el logaritmo de la misma.

**d) Control.**

El tipo de control que se hace es proporcional - integral<sup>4</sup>, su ecuación es

$$= k_p e + k_i \sum e \quad (3.1)$$

<sup>4</sup> También se hicieron pruebas con un controlador PID, sin embargo, al agregar el elemento diferencial el sistema no presentaba un "buen" comportamiento, esto debido quizá a los tiempos muertos que se tienen.

Donde las constantes de control  $k_p$  y  $k_i$  tienen el valor de la unidad y el ajuste de ganancia realmente se realiza en el valor del error. Este ajuste se hace dividiendo por múltiplos de dos el valor del error.

**e) Transmisión.**

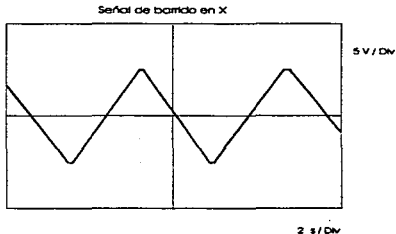
La transmisión se lleva a cabo a través de una rutina del kernel de comunicación de la tarjeta. El valor a transmitir se carga en el acumulador y se envía; primero se transmiten los ocho bits más significativos y luego los ocho bits menores.

**f) Espera con control.**

Esta rutina mantiene la punta del microscopio a distancia constante mientras espera la instrucción de inicio de barrido y mientras se almacena la información en el disco duro de la PC.

**g) Generación de rampas de barrido.**

Las rampas de barrido se generan a través de dos contadores: en  $x$  se incrementa el contador cada vez que se hace una corrección y, al término de la línea (de 4096 pasos) se hace una división por 8 para transmitir 512 valores. Una vez terminado el barrido en la dirección  $+x$ , el contador de  $y$  se incrementa en 8 en tanto que el contador de  $x$  se decrementa en uno (movimiento en la dirección  $-x$ ). De esta manera se obtiene una imagen de  $512 \times 512$  píxeles. En la figura 3.3 se muestran las rampas de barrido.



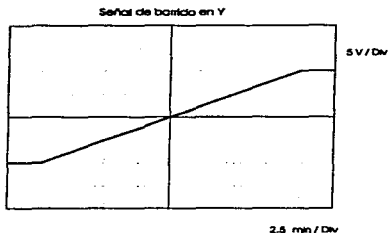


Figura 3.3 Señales de barrido.

La rutina con que se trabaja es de tipo recursivo, esto debido a que con la librería que se bajó de la red no es posible manejar simultáneamente interrupciones internas y externas. Los programas del DSP y la computadora se encuentran en el apéndice B.

### 3.7 Soporte mecánico.

La estructura mecánica se instaló sobre una mesa óptica y para probarla se realizaron intentos de entrar a túnel. El entrar a región túnel fue relativamente fácil.

Para realizar estas pruebas la muestra se polarizó con una pila de 9V. El utilizar una pila corresponde a que de ella se obtiene un voltaje más estable. El voltaje de polarización de la muestra se modifica con un potenciómetro de 10 k $\Omega$ .

### 3.8 Punta

La punta del microscopio se empotró en el extremo libre del tubo piezoeléctrico. En éste se pegó un tubo de teflón y en el centro del mismo la aguja de una jeringa. Se eligió este arreglo porque facilita cambiar la punta, la cual se afianza firmemente a la aguja por efectos de fricción. La aguja se conecta a la entrada del convertidor de corriente a voltaje por medio

de un alambre. Con el objeto de minimizar los efectos del voltaje de polarización del tubo piezoeléctrico, el alambre conductor de la corriente túnel se cubrió con un alambre magneto conectado a tierra. En la figura 3.4 se muestra el arreglo mencionado.

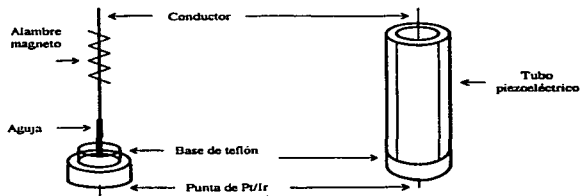


Figura 3.4 Montaje de la punta.

## Capítulo 4

# CALIBRACIÓN Y RESULTADOS

*"Lo mejor es enemigo de lo bueno"*  
(Oído del Ing. Rodolfo Peters L.).

### 4.1 Parámetros de calibración.

En esta fase del proceso de construcción del microscopio se integraron los diferentes subsistemas que lo componen y se identificaron los parámetros de calibración del mismo.

Los parámetros identificados son:

- Las constantes de control  $k_p$  y  $k_i$ .
- La corriente de referencia  $I_a$ .
- El voltaje de polarización de la muestra  $V_a$ .
- La frecuencia de control  $F_c$ .
- La frecuencia de adquisición  $F_a$ .

### 4.2 Condiciones para la calibración.

Para encontrar el valor de los parámetros de calibración se deben cubrir dos objetivos:

- a) Entrar a región túnel y
- b) mantenerse en esta región prácticamente sin el empleo de la etapa de control.

Alcanzar estos objetivos implica que se tiene un aparato que cumple con las siguientes características:

- a) Buen amortiguamiento contra las vibraciones mecánicas,
- b) adecuado sistema de aislamiento de vibraciones acústicas y
- c) correcto aislamiento de interferencia electromagnética.

Además, la punta y la muestra deben, en la medida de lo posible, cumplir las siguientes especificaciones:

- a) la punta no debe oxidarse con facilidad y
- b) la muestra debe presentar un flujo estable de corriente túnel a través de su superficie y, al igual que la punta, no debe reaccionar con facilidad ante la presencia de oxígeno.

El que se alcancen los dos objetivos iniciales, digase, entrar a región túnel y permanecer ahí, de alguna forma implica que los puntos mencionados anteriormente se cumplen. Esto, hasta el momento, no se ha logrado de manera constante; es decir, aunque actualmente se puede entrar a región túnel, resulta difícil en la mayoría de los casos mantenerse en túnel el tiempo necesario para realizar barridos sobre la superficie de la muestra. Hasta hoy se ha conseguido entrar en túnel y mantenerse ahí por tres horas una sola vez; varias otras veces se ha logrado entrar a túnel durante unos minutos.

#### 4.3 Procedimiento de calibración.

Aunque bajo las condiciones mencionadas anteriormente no se puede llevar a cabo una calibración completa, se consideró conveniente incluir la metodología a seguir en caso de que se hubieran presentado las condiciones óptimas de funcionamiento. La aplicación de dicha metodología se pudo llevar a cabo en algunos casos aunque, por supuesto, no se debe pensar que los valores encontrados sean los óptimos.

Para calibrar el microscopio se pensó utilizar una rejilla de difracción como muestra. Al barrer la rejilla y obtener una imagen con el microscopio de efecto túnel diseñado, ésta se compararía con otra, obtenida con un microscopio electrónico de barrido. Con las diferencias observadas entre ambas imágenes y tomando en cuenta las especificaciones de fábrica de la rejilla, se tendría un punto de referencia, tanto para el ajuste de parámetros como para conocer los alcances y limitaciones de nuestro microscopio.

#### 4.3.1 Frecuencia de adquisición.

No lograr permanecer en región túnel, impidió llevar a cabo desplazamientos sobre la superficie de la muestra con resultados positivos, es decir, resultados que pudieran proporcionar información respecto a alguna frecuencia adecuada de adquisición  $F_a$ . Para encontrar el valor adecuado de  $F_a$ , se debe tomar en cuenta lo siguiente [10]:

- a) Una velocidad de barrido alta ayuda a eliminar distorsiones en la imagen debido a corrimientos del tubo piezoeléctrico.
- b) Una velocidad de barrido alta reduce el tiempo necesario para que el sistema alcance el estado estable y se realice un adecuado ajuste en la altura.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, en la práctica se debe encontrar una frecuencia de barrido que permita, por un lado, que el sistema se estabilice y, por otro, que no produzca distorsiones apreciables en la imagen.

#### 4.3.2 Constantes de control.

En este caso se pudo llevar a cabo el ajuste en forma práctica, aprovechado que se podía entrar a región túnel. Con los valores para  $kp$  y  $ki$  elegidos se espera que el sistema presente las siguientes características:

- a) Estabilidad,
- b) error en estado estable  $e_{ss}$  pequeño y
- c) tiempo de respuesta adecuado.

Para encontrar los parámetros de control se siguió el siguiente procedimiento:

- a) Se dio un valor inicial a  $kp$  y a  $ki$ :  $kp = 2.44 \times 10^{-4}$ ,  $ki = 0$ .
- b) El valor de  $kp$  se incrementó hasta llegar a un valor máximo en el que el sistema todavía era estable. Este se puede considerar como un valor óptimo de  $kp$  por ser con el cual se verifica la máxima velocidad de respuesta del sistema (cuando se

trabaja con superficies rugosas una velocidad rápida de control puede evitar que la muestra y la punta hagan contacto); sin embargo, la respuesta en estado estable puede no ser satisfactoria y por otro lado, se tiene un transitorio mayor cuando se aumenta la ganancia.

- c) Se observó el comportamiento de la corriente túnel para determinar si era necesario el empleo del control integral.
- d) Al obtener un resultado positivo en el inciso anterior, se dio un valor inicial a  $ki$ :  
 $ki = 2.44 \times 10^{-6}$ .
- e)  $ki$  se incrementó y  $kp$  se decrementó de manera tal que se obtuviera una velocidad de respuesta y un error en estado estable adecuados.

#### **4.3.3 Corriente de referencia, voltaje de polarización y frecuencia de control.**

##### **a) Corriente de referencia.**

La corriente de referencia  $I_r$  se estableció de acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa de montaje y construcción. Durante estas pruebas se observó un mejor desempeño del convertidor analógico-digital y de la etapa de linealización de la corriente túnel cuando el valor de referencia se fijaba en un valor equivalente a 5 V.

##### **b) Voltaje de polarización.**

Un ajuste adecuado del voltaje de polarización  $V_b$  mejora el desempeño del control y por lo tanto, también, el desempeño del microscopio. En la práctica se observaron mejores resultados cuando  $V_b$  se encuentra en el intervalo de 1.3 a 2.5 V.

##### **c) Frecuencia de control.**

La frecuencia de control  $F_c$  se establece en forma tal que permita que el piezoeléctrico se estabilice. El ajuste de este parámetro se realizó tomando en cuenta el comportamiento del control; sin embargo, para realizar un ajuste adecuado, también se deben tomar en cuenta las imágenes que se obtienen.



#### 4.4 Resultados.

Los valores obtenidos de los parámetros del control, la corriente de referencia y el voltaje de polarización son los siguientes:

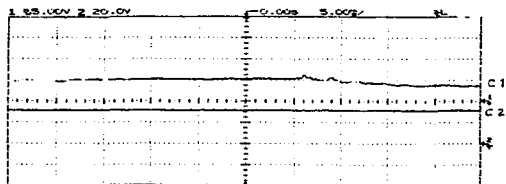
- $k_p = 3.91 \times 10^{-3}$
- $k_i = 1.95 \times 10^{-3}$
- $I_r = 5 \text{ V}$
- $V_b = 2.3 \text{ V}$

En la figura 4.1 se muestran las señales observadas en el osciloscopio.

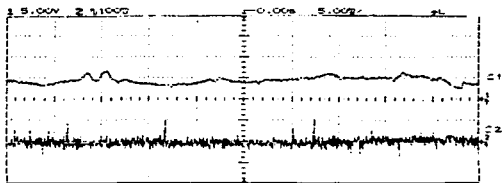
Como ya se mencionó, hasta el momento no ha sido posible mantener el microscopio en región túnel de manera constante: esto puede deberse a problemas en el diseño o a falta de experiencia en lo que se refiere a la preparación de la punta y la muestra. A continuación se presentan algunas observaciones que se hicieron relacionadas con el diseño; sin embargo, respecto a la preparación de la punta y la muestra no es posible, por el momento, afirmar algo en concreto.

- a) El sistema mecánico del microscopio es bueno ya que es posible entrar a túnel y en algunas ocasiones permanecer ahí sin ayuda del control, sin embargo son convenientes algunas modificaciones para obtener un adecuado aislamiento contra vibraciones.
- b) Con el tiempo, el comportamiento del sistema de acercamiento semifino deja de ser predecible debido a que la viga se deforma de manera plástica (v. sección 2.7). Esta deformación provoca que el número de vueltas necesario para acercar la punta a la muestra sea diferente al que se requiere para alejar ambas superficies.
- c) Durante las pruebas se observó que el ruido acústico influye de manera importante en la posibilidad de mantenerse o no en región túnel. Ante variaciones de la voz o ruidos grandes el sistema reacciona y la punta, o se impacta contra la muestra o se sale de región túnel.

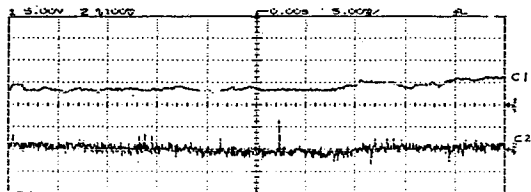
- d) Otro aspecto que influye de manera importante son los cambios súbitos de corriente en la línea de alimentación. Cuando alguna máquina ajena al equipo se enciende, la punta se impacta contra la muestra.



(a)



(b)



(C)

**Figura 4.1** Comportamiento del sistema ante la acción del control. En el canal 1 se observa la corriente túnel y en el canal 2 el voltaje de control. En la figura (a) se muestra el voltaje necesario para acercar la punta a la muestra y en las figuras (b) y (c) sólo las variaciones del voltaje de control.

## **CONCLUSIONES**

*"Poéticamente, nuestro trabajo es digno de considerarse.  
Científicamente no es posible dejar nada en claro, por lo  
que recomendamos al lector volver a leer la dedicatoria."  
(Amigo anónimo)*

### **5.1 De proyector.**

Actualmente en México son pocos los grupos que cuentan con un microscopio de efecto túnel de construcción casera (aproximadamente tres); esto quizá debido a que a pesar de que el principio físico en que se basa no es complicado, la adecuada integración de sus componentes y su calibración implica algunas dificultades. Dichas dificultades se pueden resolver, en la mayoría de los casos, con base en la experiencia y la experiencia sólo se obtiene intentando. Así, con este trabajo se están poniendo las bases para generar ese banco de experiencias.

Dados los resultados, podemos decir que hasta el momento se cuenta con un dispositivo con el cual es posible:

- a) Efectuar desplazamientos sobre la muestra superiores a 10 $\mu$ m.
- b) Modificar los parámetros de control de manera sencilla.

Por otro lado, cabe mencionar que aunque hasta la fecha no se ha obtenido alguna imagen, dados los resultados creemos que esto es factible ya que se puede entrar a región túnel y en alguna ocasión se consiguió barrer una línea, sin embargo, consideramos que antes de obtener resultados satisfactorios es necesario realizar las siguientes modificaciones:

- a) Cambiar las dimensiones del tornillo diferencial con el fin de tener una estructura más rígida. Este cambio de dimensiones implica aumentar el diámetro del tornillo y disminuir su altura.

- b) Reemplazar el sistema mecánico de acercamiento semifijo por uno electrónico, este sistema se tenía contemplado originalmente sin embargo aún no se cuenta con él. El sistema electrónico que se propone, funciona haciendo uso del efecto piezoeléctrico.**
- c) Diseñar un sistema para aislar el microscopio de ruido acústico. Se propone una doble caja de plástico con la cual se cubra el microscopio.**
- d) Alimentar todos los subsistemas con una misma clavija y conectar ésta a un regulador de voltaje.**

**Otras modificaciones convenientes son:**

- a) Sustituir la resistencia del convertidor de corriente a voltaje, que actualmente es de película de carbón, por una de película metálica. Esto con el fin de reducir el ruido del convertidor.**
- b) Reemplazar las resistencias de los amplificadores de alto voltaje por unas de precisión.**
- c) Cambiar la rutina recursiva, con la que actualmente se trabaja, por una a base de interrupciones.**
- d) Sería recomendable el empleo de un convertidor de 16 bits a la salida del control además, de.**
- e) el uso de un DSP de punto flotante con lo que se obtendría un logaritmo más exacto de la corriente de entrada.**
- f) Utilizar cable coaxial de baja capacitancia para polarizar el tubo piezoeléctrico.**
- g) Colocar el microscopio en una jaula de Faraday.**

**En lo concerniente a la punta y a la muestra es necesario desarrollar una metodología para su preparación y mantenimiento. Hasta el momento se han efectuado pruebas con acero (debidamente pulido para obtener una superficie plana) y con una rejilla de difracción cubierta, ya sea por una pequeña capa de aluminio o por una de oro.**

## 5.2 De Teais.

El diseño de este microscopio y su desarrollo nos ha ayudado a conocer nuestras capacidades, a desarrollar unas nuevas y, también, a tomar conciencia de nuestras limitaciones. Pero no sólo eso, además, nos ha permitido experimentar los problemas de tipo económico, tecnológico y administrativo que padece la ciencia en México.

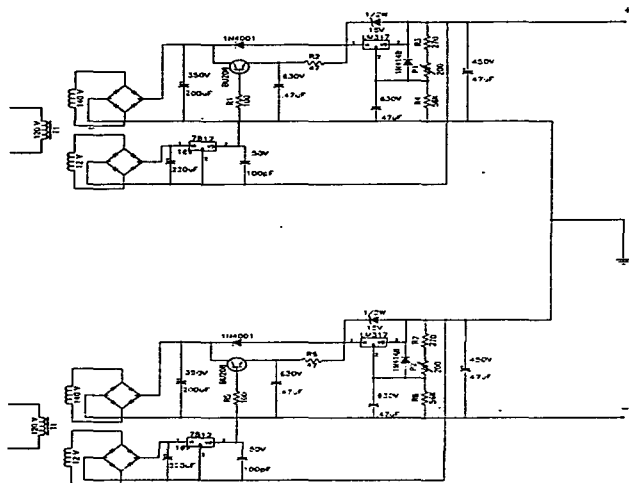
Tomando en cuenta lo anterior, podemos decir que lo más importante que nos ha dejado la ejecución de este proyecto es la experiencia. La experiencia de trabajar con componentes nuevas que por su sensibilidad, costo y periodo de entrega da miedo hasta tocar. La experiencia de elegir, de entre un mar de posibilidades, la opción que se considera mejor. La experiencia de trabajar con otras personas y de aprender a adecuar nuestro tiempo al tiempo de los demás. La experiencia de enfrentar y de vencer a la frustración. La experiencia de decidir cuando la relación tiempo-beneficio no es rentable.

*"... Tener en cuenta que fuera de nuestros pensamientos,  
no hay nada que esté por completo en nuestras manos"  
(René Descartes).*

# APÉNDICES

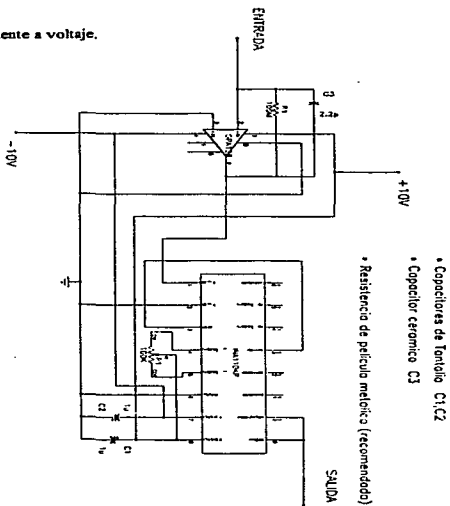
## Apéndice A1.

Fuente de alto voltaje.



## Apéndice A2.

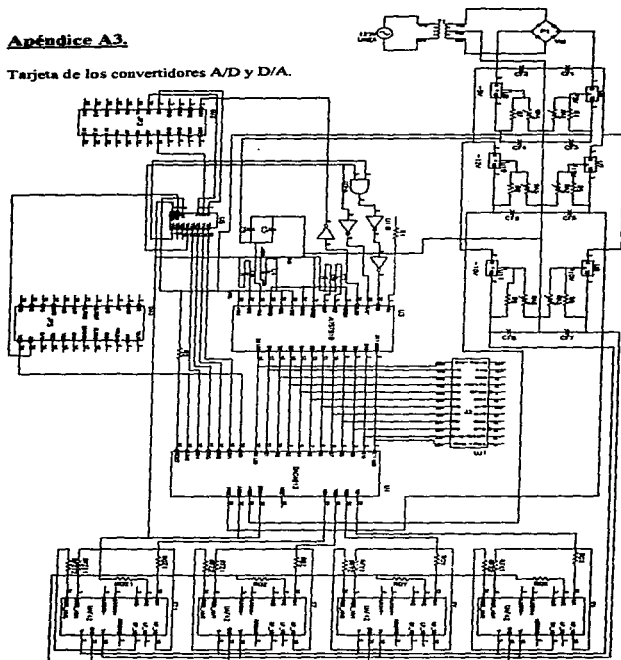
Convertidor de corriente a voltaje.





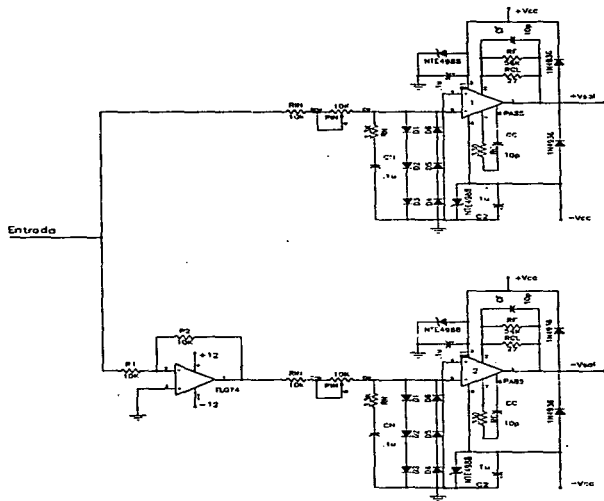
### Apéndice A3.

Tarjeta de los convertidores A/D y D/A.



## Apéndice A4.

Amplificadores de Alto voltaje. Canales x e y.





## Apéndice B.

### Programa del DSP.

Archivo STMA.ASM  
Descripción

Este programa contiene las rutinas para hacer funcionar el Microscopio de efecto túnel:

- Lectura de la punta
- Cálculo del LN de la lectura hecha
- Control de la posición del piezo en Z
- Generación de las señales de barrido X e Y
- Envío de las correcciones en la posición a la computadora

```
.mmregs
X      .set 52h
Y      .set 51h
Z1     .set 50h
CORR_T .set 54h
PINI_CNV .set 57h
BITLEN .set 79h
PRIM_VAL .set 1800h      ; Dirección de la
                          ; primera corrección
ULT_VAL .set 1a00h      ; Dirección de la
                          ; última corrección

      .ds 0F00h
VAL_RPX .word 0          ; Valor actual de
                          ; la rampa en X
VAL_RPY .word 0          ; Valor actual de
                          ; la rampa en Y
VAL_MXV .word 1000h     ; Mayor valor
                          ; que puede tener la rampa en Y
PDT     .word 1000h     ; Dirección inicial
                          ; de la tabla del logaritmo
CNS_CNV .word 800h      ; Constante para
                          ; convertir el valor leído en el ADC al rango 0 -
                          ; 0FFFh
N_REP   .word 0          ; Número de
                          ; correcciones que hace el control
CORR_TUN .word 0        ; Corriente túnel
                          ; de entrada
V_PROM  .word 0          ; Promedio de 8
                          ; correcciones
INICIAR .word 0FFFFh    ; Palabra que
                          ; indica que deben iniciarse los parámetros del DSP
lo      .word 071eh; ; lo corriente túnel de
                          ; referencia
```

```
ERROR .word 0 ; Error = lo - CORR_TUN
kp     .word 1 ; kp cte. proporcional
KP     .word 0 ; KP elemento proporcional
ERINT  .word 1 ; Error integral = Error +
Error anterior
ki     .word 1 ; ki cte. integral
KI     .word 0 ; KI elemento integral
RANGO .word 00fh ; Rango de movimiento
en z del piezo.
MOVZ   .word 0 ; Movimiento en la
dirección z.
DIFER  .word 0h ; Variable en que se guarda
la dif. de alturas
BANDERA .word 0Fh ; De su valor
depende la entrada al control integral.
VAL_MIN .word 0h ; Max. val.
negativo del CDA (-10 V)
VAL_MAX .word 0FFFh ; Max. val.
positivo del CDA (+10 V)
SOLO12B .word 0FFFh

      .ps 0a00h
entry
```

Inicio del programa y dirección de retorno después de haber enviado una línea de datos a la computadora

```
START: CLRC OVM
        CLRC SXM
        SPM 0
        LDP #1Eh ; DPP en página
0F00h

LACC INICIAR
BCND RET_E_L EQ
```

Si al preguntar por INICIAR esta localidad es diferente de 0 entonces se establecen las condiciones iniciales con las que trabajará el DSP. Valor inicial de los contadores, estados de espera para, acceso a los dispositivos externos, valores de comparación final para los contadores y la dirección en que se encuentran los vectores de interrupción.

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

ZAP  
SACL INICIAR  
OPL #0E34h,PMST ; establece  
que en la página 0800h se encuentran los vectores  
de interrupción.

LAR AR7,#PRIM\_VAL  
LAR AR6,#OFF0h  
LDP #0  
SPLK #ULT\_VAL,ARCR  
SPLK #OFF1,CWSR ; estados  
de espera = 7

SPLK #0Eh,IOWSR  
LDP #1Eh

Transfiere el valor de cada una de las rampas al  
DAC

RET\_E\_L:  
OUT VAL\_RPY,Y  
OUT VAL\_RPX,X

Espera a que se establezca la posición del piezo

ESP: LACC #10  
SACL N\_REP  
ESPI: RPT #50000  
NOP

Inicia la conversión de la lectura de la punta del  
microscopio en el punto que se encuentra  
actualmente

INI\_CNV:  
OUT VAL\_RPX,PINI\_CNV ;  
Inicia la conversión A/D  
RPT #30  
NOP ; Espera a que  
esté lista la conversión.

Se lee la conversión hecha, se convierte al rango  
0 - OFFFh y se obtiene el logaritmo de la misma

CONV:  
LDP #1Eh  
MAR \*,AR7  
IN CORR\_TUN,CORR\_T ;  
Lectura del ADC  
LACC #41h  
ADD CORR\_TUN ;  
Eliminación del offset del convertidor  
SACL CORR\_TUN

CALL LN\_CNV ; Cálculo  
del logaritmo de la corriente leída

SACL \*  
CALL CONTROL ; Corrección  
en la posición del piezo

LACC N\_REP  
SUB #1  
NOP  
NOP  
SACL N\_REP  
BCND ESP1,GT

LACC DIFER  
SACL \*+  
RPT #3  
SFR  
ADD CNS\_CNV  
NOP  
SAMM Z1 ; Salida del  
valor de corrección

ZAP  
SACL DIFER  
SACL KP  
SACL ERINT  
SUB #1  
SACL BANDERA  
CMPR 0 ; Compara si ya  
tiene almacenada una línea de 4096 correcciones

BCND REGRESA,NTC

Envío de los datos obtenidos a la computadora  
(512 de palabras de 16 Bits)

COMUN:  
LAR AR7,#PRIM\_VAL  
LACC \*+  
RPT #6 ;  
ADD \*+ ; Toma un  
promedio de cada 8 correcciones hechas y lo  
envía a la computadora.

NOP  
RPT #2 ;  
SFR ;  
SACL V\_PROM ;

Envío del Byte alto

RPT #7  
SFR

```

NOP
NOP
CALL XMTBYTE,*,AR0 ;

```

Supervisión de la posición del piezo entre cada envío a la PC

```

OUT VAL_RPX,MINI_CNV
RPT #30
NOP
IN CORR_TUN,CORR_T
LACC #41h
ADD CORR_TUN
SACL CORR_TUN
CALL LN_CNV
MAR *,AR6
NOP
SACL *
CALL CONT
LACC DIFER
RPT #3
SFR
ADD CNS_CNV
NOP
SAMM ZI

```

Envío del Byte bajo

```

LACL V_PROM
CALL XMTBYTE,*,AR0
MAR *,AR7
ZAP
SACL DIFER
CMPR 0
BCND COMUN,NTC

```

El valor de la rampa en Y se incrementa en múltiplos de 8, si ha llegado al valor máximo inicia la rutina de alejamiento del piezo.

```

LACC VAL_MXY
SACB
LACC VAL_RPY
ADD #8
SACL VAL_RPY
CRGT
NOP
BCND ULT_LIN,C

```

Reinicio de los parámetros para la siguiente línea de datos

```

LAR AR7,#PRIM_VAL

```

```

LDP #0
SPLK #2,IMR
B ESPERA

```

Después de tomar un dato incrementa o decrementa el valor de la rampa en X dependiendo del valor que tenga la rampa en Y

```

REGRESA:
BIT VAL_RPY,12
NOP
NOP
BCND P_NEG,TC
LACC VAL_RPX
ADD #8
B VAL_MEM

```

Si el valor de la rampa en Y es múltiplo impar de 8 la pendiente es negativa

```

P_NEG:
LACC VAL_RPX
SUB #8

```

```

VAL_MEM:
SACL VAL_RPX
NOP
NOP
OUT VAL_RPX,X
B ESP

```

; Regresa para corregir en el punto siguiente. Lee en una tabla los valores logarítmicos calculados para cada uno de los valores que puede tomar la entrada.

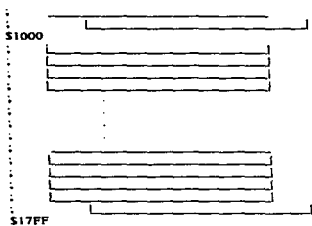
```

LN_CNV:
LDP #1Eh
LACC CORR_TUN
MAR *,AR5
ADD PDT
SAMM AR5
NOP
NOP
LACC *,0,AR7
RET

```

La conversión logarítmica de la lectura del ADC se hace de la siguiente forma.

Se toma el valor absoluto de la lectura y se le suma un offset (dirección de inicio de la tabla \$1000) y se hace direccionamiento indexado a través de un registro auxiliar (AR5). El resultado se entrega en la parte baja del Acumulador. Dir. en la tabla = Lectura (CORR\_TUN) + \$1000



Inicio de la rutina de alejamiento del piezo si ya se han barrido 512 líneas

```

ULT_LIN: LACC MOVZ
         SUB #1
         SACL MOVZ ; Se toma el
         último valor en la posición del piezo y se empieza
         a contraer.

```

```

SAMM Z1
RPT #5000
NOP
BCND ULT_LIN,GEQ
IDLE ; El DSP queda en un
estado de ahorro de energía al final del barrido.

```

Subrutina que transmite en forma serial cada dato hacia la computadora en formato Rn2 (8 bits de datos sin paridad y 2 bits de paro). Se debe tener las siguientes condiciones a) el acumulador debe contener el valor que se transmite b) ARP=0. (Modifica los valores de los registros auxiliares AR0 y AR5).

```

XMT: NOP
XMTBYTE:
         BCND XMT,BIO ; Se supone una
         señal de sincronía con la PC (0)
         LDP #0
         CLRC C ; Bit de inicio = 0
         LAR AR5,#8 ; Contador: 1 bit de
         inicio + 8 bits de datos.
NEXTBIT:

```

```

         BCND SNDO,NC ; Si C = 1 envía
1 de otra
forma envía 0
SNDI:
         SETC XF ; Transmite 1
         B SND
SNDO:
         CLRC XF
SND:
         RPT BITLEN ; Envía un bit
         MAR *,AR5
         ROR ; LSB(ACC) -> Carry
         BANZ NEXTBIT,- ; Se repite para
         la palabra completa (9 bits)
         SETC XF
         RPT BITLEN ;
         NOP ; Envía los dos bits
de paro
         RPT BITLEN ; /
         NOP ; /
         MAR *,AR7
         LDP #1Eh
         RET

```

Aquí espera el DSP a que la computadora le envíe la instrucción de reinicio después de haber transmitido una línea de datos.

```

ESPERA: LDP #1Eh
         MAR *,AR7
         OUT VAL_RPX,PIN1_CNV
         RPT #50
         NOP
         IN CORR_TUN,CORR_T
         LACC #41h
         ADD CORR_TUN
         AND SOLO12B
         SACL CORR_TUN
         CALL LN_CNV
         SACL *
         CALL CONTROL
         LACC DIFER
         RPT #3
         SFR
         ADD CNS_CNV
         NOP
         SAMM Z1 ; de datos promedio
         RPT #2000
         NOP
         B ESPERA

```

Inicio de la Ruina de control

CONT: LDP #1Eh  
 MAR \*,AR6  
 B CARGA

CONTROL:  
 LDP #1Eh  
 MAR \*,AR7  
 CARGA: ZAP  
 LACC \*  
 SETC SXM

C\_ERROR:  
 SUB Io ;Cálculo del error  
 SACL ERROR

PROPORCI: ;Cálculo del  
 elemento proporcional

RPT #8  
 SFR  
 SACL KP ;Condición  
 LACC BANDERA  
 de entrada para el elemento integral.

BCND CONTDI,EQ  
 ZAP  
 SACL BANDERA  
 B SALIDA

CONTDI: CALL INTEGRAL

SALIDA: SETC OVM  
 LACC KP,16  
 ADD ERINT,16  
 SACH DIFER  
 CLRC OVM  
 RET

INTEGRAL: ;Cálculo del  
 elemento integral

SETC OVM  
 SETC SXM  
 LDP #1Eh  
 NOP  
 LACC ERROR,16  
 RPT #8  
 SFR  
 ADD ERINT,16  
 SACH ERINT  
 CLRC OVM  
 CLRC SXM  
 RET

SAL\_ZI: ;Salida cuando no  
 estamos en la zona de control  
 LACC DIFER  
 BCND VALLE,GT

CIMA:  
 OUT VAL\_MIN,ZI  
 RET

VALLE:  
 OUT VAL\_MAX,ZI  
 RET

.ps 0C00h  
 .entry

Inicio de la rutina de acercamiento

ENTR LAR AR7,#1000h  
 ZAP  
 SAMM X ; Se establecen X e Y  
 para que la imagen comience en una de las  
 esquinas del área que se barrará.

SAMM Y ;  
 LDP #1Eh  
 LACC #0FFFh ; Inicia una rampa en  
 Z para extender el pieza

SACL MOVZ  
 SAMM ZI  
 RPT #40000  
 NOP  
 ACERCAM CPL #0h,MOVZ  
 NOP  
 NOP  
 BCND FUERA,T.TC  
 LACC MOVZ  
 SUB #1  
 SAMM ZI  
 SACL MOVZ  
 RPT #50000  
 NOP  
 SAMM PINI\_CNV  
 RPT #30  
 NOP

IN CORR\_TUN,CORR\_T ; se toma  
 la corriente de entrada y se hace el cálculo de su  
 valor logarítmico

CALL LN\_CNV

SUB Io  
 NOP  
 NOP



```

BCND ACERCAM.LT ; Si la
corriente detectada es mayor o igual al valor de
referencia el microscopio ha entrado en la region
túnel y se envia $FF al programa en la PC

```

```

ZAP
SUB #1
CALL XMTBYTE,*_ARO
LDP #0
SPLK #2,IMR
LDP #1Eh
B ESPERA

```

FUERA\_T LACC #0FFFh ; Si al final de la rampa no se detecta corriente o una corriente

### Programa de la computadora

```

#include <HI50A.H>
#include "c:\cvga.h"

typedef unsigned char LIN[1024][16];
LIN linea; /* Matriz en la que se almacenan
16 líneas de datos de 512 correcciones de 16 bits
*/

int ij,h,k,resp;
FILE *imagen; /* Variable de archivo en la
que se almacenan los datos */
UINT progdata;

const int
UART_BASEADDR=0x2f/*Dirección base del
UART*/

int main()
{
  unsigned x,tunel;
  /* se establecen los valores iniciales de los
  registros del UART para el puerto COM2 y la
  velocidad de transmisión a 57600 bps */

  prm.com = 1;
  prm.speed = 57600;
  prm.PGM_CNT = 0x980;
  prm.INVERSE = YES;
  clrscr();
  i=0;
  k=0;
  tunel=0;

```

menor a la de referencia, se contrae el piezo, se envía \$00 a la computadora y se espera a que se vuelva a intentar entrar a túnel.

```

SAMPM Z1
SACL MOVZ
ZAP
CALL XMTBYTE,*_ARO
LDP #0
SPLK #2,IMR
LDP #1Eh
NOP
NOP
B CICLO
CICLO

```

/\* Detecta la presencia y buen funcionamiento del DSP \*/

InitializeMonitor();

/\* Carga la tabla del logaritmo y el programa completo del microscopio \*/

LoadDsk("ln.dsk");
LoadDsk("stma.dsk");

clrscr();
imagen=fopen("test.stm","wb");

x=0;
while(tunel==0)

{
 clrscr();
 FreeRun(0xC00); /\* Se manda al
DSP la instrucción para iniciar el acercamiento \*/

while (k<1) /\* Aquí espera a
recibir la respuesta de si se llegó o no a región
túnel \*/

{
 x = (inp(UART\_BASEADDR+5) & 0x9f) << 8;
 if (x&0x100)

{tunel=(unsigned char)
inp(UART\_BASEADDR);&0xff; k++;
}

}

```

if (túnel==0) /* Si no llegó a túnel da la opción
de intentar nuevamente */
{
    printf("Fuera de Túnel!\n");
    printf("Presione una tecla para intentar
de nuevo o ESC para salir");
    sendbyte(KB_ESC);
    resp=getche();
    k=0;
    if (resp==KB_ESC) exit(0);
}
else /* Si entró espera a que se
indique el momento en que debe empezar el
barrido */
{
    printf("El microscopio entró a túnel!\n");
    printf("Presione una tecla para iniciar el
barrido");
    resp=getche();
    if (resp==KB_ESC) exit(0);
}
}

/* Se prepara el modo de despliegue de la imagen
y la paleta de colores que utilizará */

vga_mode(VGA320200);
BC=425;
RC=256;
GC=425;
W=300;
H=55;
h=0;
rainbow_palette();

/* Inicia el programa principal del DSP y se
reciben los datos de corrección */

for(j=0;j<32;j++)
{
    h=0;
    for(k=0;k<8;k++)
    {
        i=0;
        sendbyte(KB_ESC);
        FreeRun(0x0a00);
    }
}

/* Las líneas de datos se capturan del puerto serie
en forma ascendente o descendente en la matriz

```

```

de datos debido a la forma de barrido del
microscopio*/

while(i<512)
{
    x = (inp(UART_BASEADDR+5) &
0x9f) << 8;
    if (x&0x100)
        línea[i++][(h)]=((unsigned char)
inp(UART_BASEADDR))&0xff;
    }
    h++;
    delay(1);
    sendbyte(0x01b);
    FreeRun(0x0a00);
    while(i>0)
    {
        x = (inp(UART_BASEADDR+5) &
0x9f) << 8;
        if (x&0x100)
            línea[i-1][(h)]=((unsigned char)
inp(UART_BASEADDR))&0xff;
        }
        h++;
    }

/* Almacena cada 16 líneas recibidas */

fwrite(&línea,1,16384,imagen);

/* Despliega la imagen recibida */

for(k=0;k<16;k++)
    for(i=0;i<256;i++)
    {
        vga_dot(i,k,línea[i][k*16]);
    }
}

/* Se cierra el archivo de imagen */

h=fopen(imagen);
getch();
text_mode(); /*Regresa a modo texto */
printf("!!! Ya TERMINE!!!\n");
return(0);
}

```

## BIBLIOGRAFÍA

"Citar es como aportar testigos en un juicio"  
(U. Eco)

### REFERENCIAS

1. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber, & E. Weibel. *Appl. Phys. Lett.* 40,178,1982.
2. Kuk & P. J. Silverman. *Rev. Sci. Instrum.* 60(2), 165-180, 1989.
3. Hansma & J. Tersoff. *J. Appl. Phys.* 62(2),15 January, R1-R13,1987.
4. Grafström, J. Kowalski & R. Neumann. *Meas. Sci. Technol.* 1, 139-146, 1990.
5. Rutkowski, George B. *Operational Amplifiers: integrated and hybrid circuits.* John Wiley & Sons, Inc, NY. 1993.
6. [ftp.ti.com/pub/mirrors/tms320bbs](http://ftp.ti.com/pub/mirrors/tms320bbs).
7. Stroschio, Joseph A. & Kaiser, William J. *Scanning Tunneling Microscope. Methods of experimental physics: v.27.* Academic Press, Inc., UK. 1993.
8. Product Line, Staveley Sensors Inc.(Fax).
9. Chen, J. *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy.* Oxford series in optics and imaging sciences. Oxford University Press. 1993.
10. Guillaume Vendroux. *Scanning Tunneling Microscopy in Micromechanics Investigations.* PhD thesis, California Institute of Technology, 1994.
11. APEX. Application Note 25. *Driving Capacitive Loads.*
12. APEX. Application Note PA85 - PA85A. *High Voltage Power Operational Amplifiers.*
13. Información de la red. Artículo escrito por Wiston Schoenfeld.
14. Dr. Miguel A. Huerta G. Comunicación personal.
15. Ing. Rodolfo Peters Lammel. Comunicación Personal.

### **LIBROS, MANUALES Y NOTAS DE ESPECIFICACIONES**

- APEX. Accessories Information. *Heatsinks, Mating Sockets, Washers, Vendors.*
- Bogart, Theodore F. *Linear Electronics.* Maxwell Macmillan International, NY. 1994.
- Burr-Brown. *IC Data Book Data Conversion Products.* 1995
- Burr-Brown. *IC Data Book Linear Products.* 1995.
- ftp. Coast Net/Simtel/DOS/IC
- C. Derman. *Embedded Systems Programming.* November, 32-44, 1992
- Texas Instruments. *TMS320C5x DSP Starter Kit. User's Guide.* 1994.
- Texas Instruments. *TMS320C5x. User's Guide.* 1993.
- Wait, John V., Huelsman, Lawrence P. & Korn, Granino A. *Introduction to Operational Amplifiers.* International Student Edition, McGraw Hill. 1997