

**Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

**IE – 0502 Proyecto Eléctrico**

**DESARROLLO DE UN MICROSCOPIO  
DE EFECTO TÚNEL**

**Por:  
JOSE PABLO ARRIETA NAVARRO**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
Julio del 2010**

# **DESARROLLO DE UN MICROSCOPIO DE EFECTO TÚNEL**

**Por:  
JOSE PABLO ARRIETA NAVARRO**

Sometido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica  
de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Costa Rica  
como requisito parcial para optar por el grado de:

**BACHILLER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Aprobado por el Tribunal:

---

Ph. D. Arturo Ramírez Porras  
Profesor Guía

---

M. Sc. Enrique Coen Alfaro  
Profesor lector

---

Ing. José Miguel Páez Jiménez  
Profesor lector

## **DEDICATORIA**

A mis padres, abuelos, hermanos y novia, gracias por todo.

## **RECONOCIMIENTOS**

Deseo agradecer al Centro de investigación en ciencia e ingeniería de materiales de la Universidad de Costa Rica, por las facilidades brindadas para la prueba del sistema y desarrollo del sistema.

A Víctor Rodríguez Araya y Juan Carlos Valverde Fonseca por el desarrollo de la cabeza del microscopio sin ellos este desarrollo no hubiese sido posible.

A Diego González Flores y Roberto Urcuyo Solórzano por el préstamo de muestras para uso en las etapas preliminares del desarrollo.

A las compañías Texas Instruments, Analog Devices y Ohmite Manufacturing por los dispositivos electrónicos suministrados para el desarrollo del proyecto.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO 1: Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Unidad de Barrido.....	2
1.1.2 Unidad de control de tunelaje .....	3
1.1.3 Unidad de procesamiento y visualización .....	4
1.2    Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos .....	5
1.3    Metodología.....	6
1.3.1 Diseño y programación de equipo electrónico y mecánico .....	6
1.3.2 Implementación física.....	6
1.3.3 Verificación experimental.....	6
<b>CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico .....</b>	<b>7</b>
2.1    Microscopía .....	7
2.1.1 Microscopía Óptica.....	7

2.1.2	Microscopía Electrónica .....	8
2.1.3	Microscopía de barrido superficial .....	8
2.2	Tunelaje Cuántico .....	11
2.2.1	Descripción General .....	11
2.2.2	Teoría básica de tunelaje.....	11
2.2.3	Conductancia en el microscopio de tunelaje.....	14
2.3	Materiales Piezoeléctricos .....	16
2.3.1	Descripción General .....	16
2.3.2	Características Cilindro Piezoeléctrico .....	17
2.3.3	Propiedades Físicas.....	19
2.4	Consideraciones de Ruido .....	23
2.4.1	Descripción general .....	23
2.4.2	Ruido Electrónico .....	23
2.4.3	Ruido Mecánico.....	25
2.5	Sistemas de Control .....	27
2.5.1	Descripción General .....	27
2.5.2	Proyecto actual.....	29
2.6	Microcontrolador 8051 .....	30
2.6.1	Descripción general .....	30
2.6.2	Texas Instruments MSC1211Y5.....	31
<b>CAPÍTULO 3: Diseño General .....</b>		<b>34</b>

3.1	Diseño Electrónico.....	34
3.1.1	Amplificación de corriente .....	35
3.1.2	Sistema de Control.....	37
3.1.3	Amplificación de voltaje eje Z.....	39
3.1.4	Amplificación para adquisición de datos.....	40
3.1.5	Modo de altura constante .....	41
3.1.6	Eje Z completo.....	41
3.1.7	Amplificación ejes X y Y .....	43
3.1.8	Bias de tunelaje.....	46
3.1.9	Diseño implementado .....	46
3.1.10	Aislamiento electromagnético .....	49
3.2	Programación.....	50
3.2.1	Variables importantes .....	50
3.2.2	Funcionamiento general.....	57
3.2.3	Temporización .....	75
3.3	Diseño Mecánico .....	78
3.3.1	Cabeza del microscopio.....	78
3.3.2	Piezoeléctrico.....	81
3.3.3	Aislamiento mecánico.....	82
3.3.4	Posibilidades a futuro.....	84
	<b>CAPÍTULO 4: Implementación y verificación experimental .....</b>	<b>85</b>

4.1	Electrónica .....	86
4.1.1	Sistemas elaborados .....	86
4.1.2	Pruebas realizadas .....	89
4.1.3	Conclusiones .....	128
4.2	Mecánica .....	129
4.2.1	Sistema desarrollado .....	129
4.2.2	Conclusiones .....	131
4.3	Programación .....	132
4.3.1	Barrido superficial y transmisión de datos .....	132
4.3.2	Interfaz Gráfica .....	137
<b>CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones .....</b>		<b>139</b>
5.1	Panorama futuro .....	139
5.2	Logros Generales .....	140
5.3	Recomendaciones .....	141
5.4	Conclusiones .....	142
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>143</b>
<b>APÉNDICES .....</b>		<b>145</b>
A.1	Amplificadores operacionales .....	145
A.1.1	Amplificador inversor .....	145
A.1.2	Amplificador No Inversor .....	146



A.1.3	Amplificador Diferencial .....	146
A.1.4	Seguidor de Voltaje.....	147
A.1.5	Amplificador Sumador.....	147
A.1.6	Amplificador Integrador .....	148
A.1.7	Amplificador Derivador .....	148
A.1.8	Amplificador Logarítmico .....	149

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama general de microscopio de efecto túnel .....	2
Figura 1.2: Proceso realizado por la unidad de barrido .....	3
Figura 1.3: Sistema de control de la corriente de túnel .....	4
Figura 2.1: Sistema de microscopía control de la corriente de túnel .....	10
Figura 2.2: Parte real de la función de onda de una partícula al pasar una barrera .....	13
Figura 2.3: Deflexión de un cilindro de material piezoeléctrico. ....	16
Figura 2.4: Contactos, cilindro piezoeléctrico, vista aérea .....	17
Figura 2.5: Medidas propias del cilindro piezoeléctrico.....	18
Figura 2.6: Método para la determinación de la constante piezoeléctrica.....	20
Figura 2.7: Sistema de aislamiento mecánico.....	26
Figura 2.8: Diagrama de Bloques controlador PID .....	28
Figura 2.9: Diagrama de bloques del Microcontrolador 8051 básico.....	31
Figura 2.10: Diagrama de bloques del Microcontrolador MSC1211Y5 utilizado .....	32
Figura 3.1: Etapa de amplificación completa .....	36
Figura 3.2: Sistema de control .....	38
Figura 3.3: Etapa de amplificación final eje Z.....	39
Figura 3.4: Amplificación para adquisición de datos .....	40
Figura 3.5: Modo de altura constante .....	41
Figura 3.6: Eje Z sistema de microscopía completo .....	42
Figura 3.7: Amplificación ejes X y Y .....	45

Figura 3.8: Amplificación del Eje X/Y y Voltaje de bias a implementar.....	47
Figura 3.9: Eje Z sistema de microscopía a implementar.....	48
Figura 3.10: Diagrama de estados del sistema de microscopía .....	57
Figura 3.11: Diagrama función RESET_general() .....	58
Figura 3.12: Diagrama función ESCANEEO().....	61
Figura 3.13: Diagrama función ESCANEEO_reset() .....	62
Figura 3.14: Diagrama función PIXEL_censar().....	63
Figura 3.15: Diagrama función PIXEL_guardar(pointer) .....	64
Figura 3.16: Diagrama función FILA_transmitir().....	65
Figura 3.17: Diagrama función FILA_nueva().....	66
Figura 3.18: Diagrama función ESCANEEO_finalizar() .....	67
Figura 3.19: Diagrama función PIXEL_mover(direccion).....	68
Figura 3.20: Diagrama función CONFIGURACION().....	69
Figura 3.21: Diagrama función CONFIG_censar() .....	71
Figura 3.22: Diagrama función CONFIG_evaluar().....	72
Figura 3.23: Diagrama función CONFIG_almacenar().....	73
Figura 3.24: Diagrama función WAIT(tiempo).....	73
Figura 3.25: Diagrama función ACERCAMIENTO() .....	74
Figura 3.26; Diagrama mecánico del microscopio .....	79
Figura 3.27: Geometría sistema de acercamiento fino .....	81
Figura 3.28: Sistema de aislamiento mecánico.....	83
Figura 4.1: Sistema de microscopía completo .....	85

Figura 4.2: Sistema de control (Amarillo) y Microcontrolador (Rojo) .....	86
Figura 4.3: Amplificador de Transimpedancia (Verde).....	87
Figura 4.4: Sistema de control, con numeración a utilizar .....	88
Figura 4.5: Sistemas amplificación eje X y Y, Voltaje Bias, con numeración a utilizar.....	89
Figura 4.6: OP1: Prueba Amplificador I_REF .....	91
Figura 4.7: OP2: Prueba Amplificador Sustractor.....	92
Figura 4.8: OP3: Prueba Amplificador Control Proporcional, $V_{IN} = 1V$ .....	94
Figura 4.9: OP3: Prueba Amplificador Control Proporcional, $V_{IN} = -1V$ .....	94
Figura 4.10: Tiempo de Saturación OP4: $V_{IN} = 10mV$ , $\tau=1ms$ . .....	97
Figura 4.11: Tiempo de Saturación OP4: $V_{IN} = 10mV$ , $\tau=100ms$ . .....	97
Figura 4.12: OP4: Controlador Integral, Saturación en DC, $\tau=1ms$ .....	99
Figura 4.13: OP4: Controlador Integral, Saturación en DC, $\tau=100ms$ .....	99
Figura 4.14: OP4: Controlador Integral, Prueba barrido de frecuencia AC, $\tau=1ms$ .....	101
Figura 4.15: OP4: Controlador Integral, Prueba barrido de frecuencia AC, $\tau=100ms$ .....	101
Figura 4.16: OP4: Control Integral, voltaje sinusoidal .....	103
Figura 4.17: OP4: Control Integral, onda cuadrada bipolar .....	103
Figura 4.18: OP4: Control Integral, voltaje tipo rampa.....	103
Figura 4.19: OP5: Prueba Amplificador Salida, $V_{IN} = 1V$ .....	105
Figura 4.20: OP5: Prueba Amplificador Salida, $V_{IN} = -1V$ .....	105
Figura 4.21: OP9: Transimpedancia, variación amplitud de corriente .....	107
Figura 4.22: OP9: Transimpedancia, barrido de frecuencia .....	108
Figura 4.23: OP9: Transimpedancia, barrido ruido $V_Z\_PIEZO$ .....	110

Figura 4.24: OP9: Transimpedancia, barrido de frecuencia .....	110
Figura 4.25: OP9: Transimpedancia, barrido ruido $\pm V_X$ PIEZO.....	111
Figura 4.26: OP6: Prueba Salida ADC V-Z-PIEZO.....	113
Figura 4.27: OP7: Prueba Inversor Salida ADC V-Z-PIEZO .....	114
Figura 4.28: OP8: Prueba Salida ADC I-TUNEL .....	115
Figura 4.29: OP10x, OP11x: Prueba Amplificadores V-EJE-X.....	117
Figura 4.30: OP10y, OP11y: Prueba Amplificadores V_EJE_Y .....	119
Figura 4.31: OP12: Seguidor Voltaje de Bias.....	120
Figura 4.32: Cilindro piezoeléctrico con contactos .....	122
Figura 4.33: Jaula de Faraday del sistema de microscopía.....	124
Figura 4.34: Muestra de oro sobre substrato de vidrio .....	125
Figura 4.35: Acercamiento punta de Tungsteno.....	126
Figura 4.36: Cabeza de microscopía, vista frontal.....	129
Figura 4.37: Cabeza de microscopía, vista lateral .....	130
Figura 4.38: Cabeza de microscopía, vista aérea.....	130
Figura 4.39: Datos recibidos mediante prueba de transmisión serial .....	135
Figura 4.40: Interfaz gráfica, recepción RS232 y graficado tridimensional.....	138
Figura A.1.1: Amplificador inversor .....	145
Figura A.1.2: Amplificador No Inversor .....	146
Figura A.1.3: Amplificador Diferencial .....	146
Figura A.1.4: Seguidor de Voltaje.....	147
Figura A.1.5: Amplificador Sumador .....	147

Figura A.1.6: Amplificador Integrador .....	148
Figura A.1.7: Amplificador Derivador .....	148
Figura A.1.8: Amplificador Logarítmico.....	149

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Constante de decaimiento y altura aparente de barrera, materiales varios .....	14
Tabla 2.2: Tabla de constantes importantes de materiales piezoeléctricos.....	19
Tabla 3.1: Asignación valores de configuración .....	70
Tabla 3.2: Características piezoeléctricas del cilindro piezoeléctrico .....	81
Tabla 4.1: Saturación OP1: Amplificador I_REF.....	90
Tabla 4.2: Saturación OP2: Amplificador Sustractor .....	91
Tabla 4.3: Saturación OP3: Controlador Proporcional.....	93
Tabla 4.4: Saturación OP4, Extremos del tiempo de saturación del integrador .....	96
Tabla 4.5: Saturación OP5: Controlador Proporcional.....	104
Tabla 4.6: Saturación OP7: Inversor Salida ADC V_Z_PIEZO .....	113
Tabla 4.7: Saturación OP10x, OP11x: Amplificadores V-EJE-X.....	116
Tabla 4.8: Saturación OP10y, OP11y: Amplificadores V_EJE_Y.....	118
Tabla 4.9: Saturación OP12: Seguidor Voltaje de Bias.....	119
Tabla 4.10: Piezoeléctrico frecuencia resonancia del cilindro .....	121

## NOMENCLATURA

- Å     Angstrom equivale a  $10^{-10}$  m
- Nm    Nanómetro equivale a  $10^{-9}$  m o bien  $10\text{Å}$
- $d_{31}$     Constante piezoeléctrica de un material
- STM   Microscopio de efecto túnel
- AFM   Microscopio de fuerza atómica
- ADC   Conversión digital / analógica
- DAC   Conversión analógica / digital
- SPM   Microscopía por barrido superficial
- PID   Controlador proporcional, integral, derivativo



## **RESUMEN**

El presente proyecto comprende el diseño e implementación de un sistema de microscopía de efecto túnel, este sistema se basa en la utilización de las propiedades de movimiento nanométrico de los materiales piezoeléctricos y de la capacidad de tunelaje de electrones a través de una barrera de potencial, para desarrollar un sistema de topografía nanométrica.

Para desarrollar el sistema es necesario hacer uso de la teoría de control realimentado, implementando un controlador PI a base amplificadores operacionales. Junto a esto se hace necesario desarrollar un programa para desarrollar el barrido superficial, la toma y transmisión de datos. Por aparte se diseña un sistema de manejo de datos en el entorno de programación LABVIEW para recibir los datos del sistema de barrido y graficarlos en forma tridimensional, para así lograr visualizar la superficie en estudio. Se diseña también un sistema mecánico robusto para el acercamiento de la punta de barrido a la muestra y el aislamiento vibracional para lograr mantener un sistema estable de barrido.

Las secciones eléctricas (sistema de control, cilindro piezoeléctricas) y mecánica (cabeza de microscopía, aislamiento vibracional) del sistema se desarrollan de manera exitosa; el desarrollo del programa para el sistema de barrido se desarrolla buena manera y es posible verificar su funcionalidad, pero al descargar el programa al microcontrolador se presentan problemas que significaron la necesidad de hacer un cambio de microcontrolador que generó un problema inesperado que a la larga simbolizó la imposibilidad de finalizar la programación y por tanto completar el sistema de microscopía y obtener barridos con este.

## **CAPÍTULO 1: Introducción**

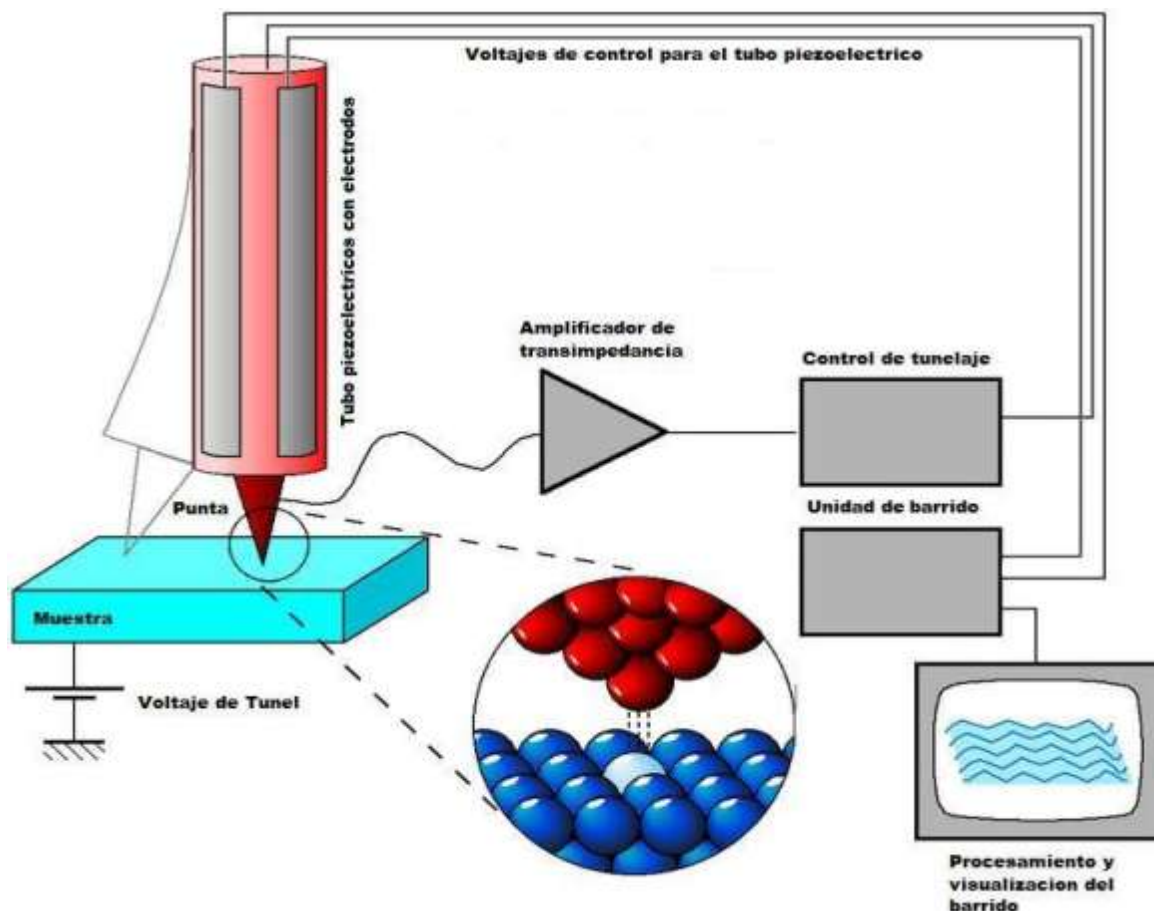
El microscopio de efecto túnel es un instrumento de gran importancia para el análisis superficial de materiales metálicos y semiconductores, esto debido a que fue el primer método de microscopía capaz de obtener resolución atómica de superficies, abriendo por tanto una nueva era para la microscopía en general.

Este sistema fue desarrollado en 1981 por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer. En la actualidad a partir de este diseño se ha logrado desarrollar sistemas mucho más complejos que comparten el tunelaje cuántico como base pero que estudian áreas muy diferentes de la física de superficies. Entre ellos están los métodos de nanolitografía y manipulación atómica. Junto a esto se da el desarrollo de diferentes sistemas de microscopía y espectroscopia, todos basados, en los fundamentos de la microscopía desarrollados por Binnig y Rohrer, pero que expanden de gran manera las características iniciales del microscopio de efecto túnel. Por esta versatilidad y el impacto que generó en la comunidad científica, es fácil notar cómo apenas cinco años luego de la invención del sistema, los creadores fueron galardonados con el premio Nobel en física.

Es a raíz de la importancia de este sistema y sus aplicaciones que se decide tomar el desarrollo de un microscopio de efecto túnel como base de este proyecto eléctrico y así poder desarrollar un sistema útil y necesario en los laboratorios de nanotecnología del país, llenando así un vacío en la física de superficies costarricense.

Para diseñar un microscopio de este tipo, se procederá a separar el sistema en tres ejes separados: la unidad de barrido, de control de tunelaje y de procesamiento y finalmente

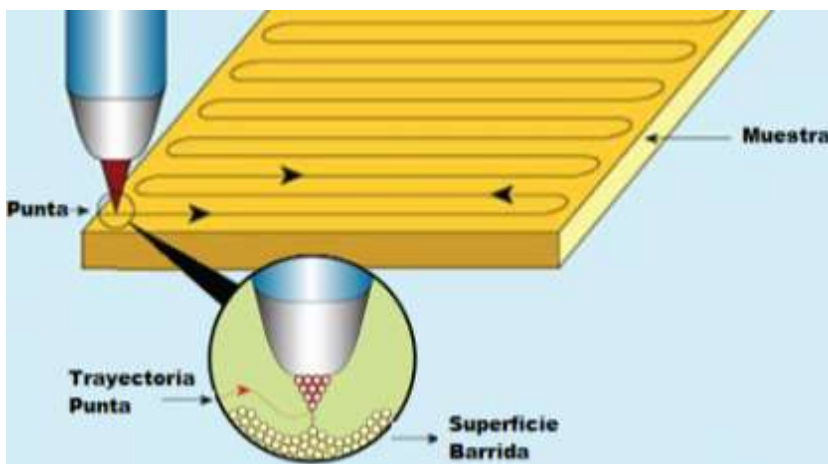
la visualización. Estas tres pueden apreciarse en figura 1.1, de la cual es posible también apreciar que cada unidad es independiente de las otras y por tanto es posible diseñar cada una por separado. A continuación se detallan estas unidades de mejor manera.



**Figura 1.1: Diagrama general de microscopio de efecto túnel**

### 1.1.1 Unidad de Barrido

Es la unidad encargada de cubrir el proceso de barrido en la superficie del material. Lo que realiza es mover la punta del microscopio sobre la superficie a medir, un punto de medición a la vez, haciendo un barrido punto a punto y línea a línea (ver figura 1.2) hasta terminar de rastrear la cantidad de líneas determinadas por el usuario.



**Figura 1.2: Proceso realizado por la unidad de barrido**

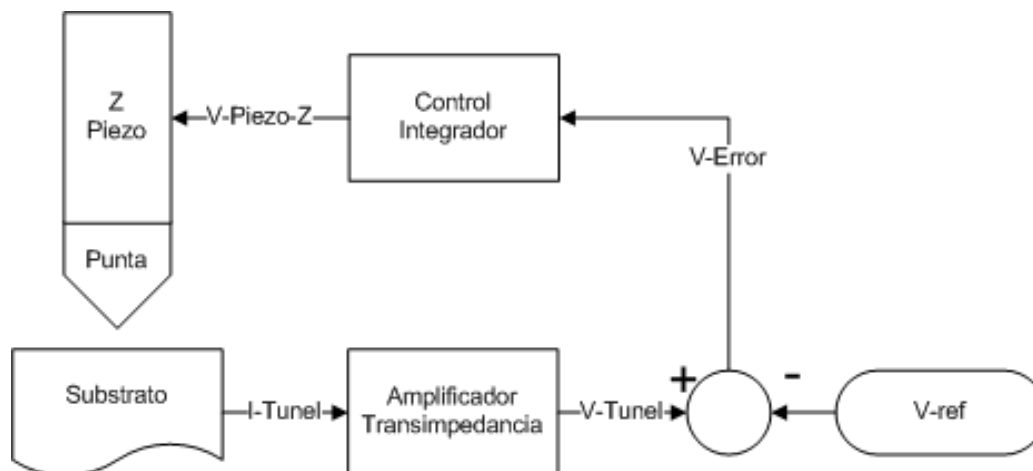
En este proyecto se utilizará un microcontrolador para realizar el barrido superficial de manera que este proceso se realice de manera digital para evitar errores de sincronización que se darían si se hiciese el barrido de manera analógica.

### **1.1.2 Unidad de control de tunelaje**

El microscopio de efecto túnel cuenta con dos modos de operación de dominio general. El primero es conocido como “modo de altura constante”, en el cual la punta del microscopio permanece inmóvil en el eje vertical y por tanto, debido a la rugosidad de la superficie, se ve aumentada o disminuida la distancia punta-muestra y por tanto la corriente de tunelaje. El segundo modo es el de corriente constante, en el que se busca mantener constante la distancia punta-muestra, de manera que la corriente de túnel no varíe. Para esto se necesita un sistema de control que modifique la posición en el eje vertical de la punta para acercarla o retraerla mientras se moviliza la punta sobre la superficie.

En este modo se toma la corriente de túnel y se compara con un valor de referencia. La diferencia se introduce en un controlador tipo Integrador, o Proporcional Integrador para

obtener una salida de voltaje que se desplace la punta necesario en cada momento. En la figura 1.3 se tiene una descripción cualitativa del sistema de control a utilizar en proyecto.



**Figura 1.3: Sistema de control de la corriente de túnel**

### 1.1.3 Unidad de procesamiento y visualización

Esta unidad es la encargada de obtener los datos procedentes de la unidad de barrido (microcontrolador) y procesar estos datos de manera que se pueda obtener una imagen tridimensional de la superficie rastreada.

En este proyecto se utilizará el entorno de programación LabView de National Instruments para desarrollar esta operación, dado que simplifica mucho la programación por sus facilidades en las áreas de interfaz gráfica y protocolos de entrada y salida de datos.

Junto con estas tres unidades también es necesario desarrollar un sistema mecánico que mantenga la punta aislada de vibraciones externas, ruidos electromagnéticos y otras fuentes de errores de medición. No obstante, debido a que esto escapa de la especialidad de ingeniería eléctrica, el desarrollo de estos sistemas se explicará de manera reducida.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Desarrollar un microscopio de efecto túnel y sus correspondientes sistemas de control, visualización y barrido superficial.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar un sistema de control para los movimientos en el eje Z de la punta de rastreo. Utilizando controladores tipo PI, desarrollados a base de amplificadores operacionales y sintonizados mediante la verificación de la curva de reacción.
- Desarrollar un sistema de barrido y toma de datos para la creación de una imagen tridimensional de la superficie muestreada. Mediante la programación de un microcontrolador tipo 8051, con interfaces analógicas para medir y suministrar las señales necesarias para el funcionamiento del sistema.
- Implementar una interfaz gráfica para el manejo de los datos propios del rastreo de la superficie. Mediante comunicaciones con el protocolo RS-232, junto a la utilización del entorno de programación LabView para la exposición de los datos obtenidos de la superficie analizada.

### **1.3 Metodología**

En el presente trabajo se busca desarrollar un microscopio de efecto túnel. Su desarrollo se verá dividido en tres etapas, las cuales se describirán a continuación:

#### **1.3.1 Diseño y programación de equipo electrónico y mecánico**

En esta etapa se busca dimensionar los sistemas y verificar prestaciones de los dispositivos, para obtener la base teórica del sistema a desarrollar. En esta etapa también es necesario realizar la programación del microcontrolador a utilizar, para que terminada esta etapa, se finalice el diseño con excepción de la implementación física y la verificación del funcionamiento del microscopio.

#### **1.3.2 Implementación física**

En esta etapa se realiza la implementación del diseño realizado en la etapa anterior. Para esto es necesario implementar el equipo además de verificar su funcionamiento básico. No se esperan resultados finales de esta etapa dado que en ésta nada más se verifica el funcionamiento de las unidades por separado y no del microscopio por completo.

#### **1.3.3 Verificación experimental**

Esta es la última parte del proyecto, en la cual se juntan todas las unidades del diseño implementadas y se busca hacer barridos y verificar su calidad en la interfaz gráfica desarrollada. En esta etapa también es necesario terminar de afinar detalles de la etapa anterior dado que en ésta, al tener todo el sistema montado, se pueden sintonizar las diferentes variables electrónicas y programáticas del sistema para obtener los mejores resultados en el barrido superficial.

## CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico

### 2.1 Microscopía

La microscopía es el área científica que busca expandir nuestro ámbito visual del mundo, amplifica y aumenta la resolución del ojo humano en cada momento. Este campo actualmente cuenta con tres áreas de desarrollo separadas: la microscopía óptica, la electrónica y la de barrido. Pero antes de referirse a estas técnicas, es necesario explicar cierta terminología utilizada más adelante.

En microscopía se habla de la resolución y de razón de amplificación. Estos son métodos ligados que ayudan a comprender las cualidades de cada uno. La resolución se refiere al tamaño mínimo la superficie que es posible de distinguir con respecto a otra sección de superficie. Nos detalla cuan pequeño es lo que podemos distinguir. En el ojo humano se tiene un tamaño de resolución de alrededor de 0.2mm. Junto con esto se tiene el término de razón de amplificación que corresponde a la siguiente expresión:

$$\text{Razón de Amplificación Sistema} = \frac{\text{Resolución Ojo Humano}}{\text{Resolución Sistema}} \quad (2.1-1)$$

De esto se comprende que una razón de amplificación alta simboliza una ampliación y mejora significativa de la resolución de la imagen. Teniendo esto desarrollado es posible detallar de mejor manera las diferentes tecnologías de microscopía actuales.

#### 2.1.1 Microscopía Óptica

En la microscopía óptica, se utilizan las leyes de difracción, refracción y reflexión para aumentar, por este medio el tamaño de una imagen sin distorsionarla y lograr así



mejorar las capacidades de resolución de la visión humana. Con este método es posible obtener una razón de amplificación de 500X y se utiliza cuando se desean observar objetos vivos, como por ejemplo, bacterias, células, hongos y demás.

Una gran ventaja de este método radica en el hecho de que no es necesario tratar previamente la muestra, pudiendo mantener las muestras en el ambiente propio de está logrando así no hacerle daño, un gran problema del método de barrido de electrones.

### **2.1.2 Microscopía Electrónica**

La microscopía electrónica consiste en un método de amplificación, en el cual se utiliza una corriente de electrones para formar una imagen de una superficie. En este método se logra una razón de amplificación de hasta 200kX, dando una resolución de 10Å para sistemas modernos de microscopía.

Este método cuenta con un pequeño problema dado que es necesario disecar las muestras antes de poder observarlas y por tanto no es posible hacer análisis de materiales o tejidos vivos, gran limitante para los sistemas biológicos que eran los principales usuarios de la microscopía óptica.

### **2.1.3 Microscopía de barrido superficial**

Los métodos citados anteriormente consisten en métodos instantáneos de obtención de imagen, dado que se cuenta con un flujo constante de electrones o fotones para resolver la imagen de la superficie muestreada. Por su parte los métodos de barrido son diferentes dado que en ellos, si bien se pueden tener fotones o electrones, se procede barriendo la superficie posición por posición, de manera que se hacen medidas de una manera ordenada y con mayor control que en los métodos anteriores. El microscopio de efecto túnel recae en

esta categoría dado que cuenta con un sistema de barrido superficial que se encarga de movilizar la punta sobre la superficie y tomar medidas de corriente de túnel, al hacer esto se logra una razón de amplificación de hasta 20MX logrando así obtener resolución atómica por primera vez.

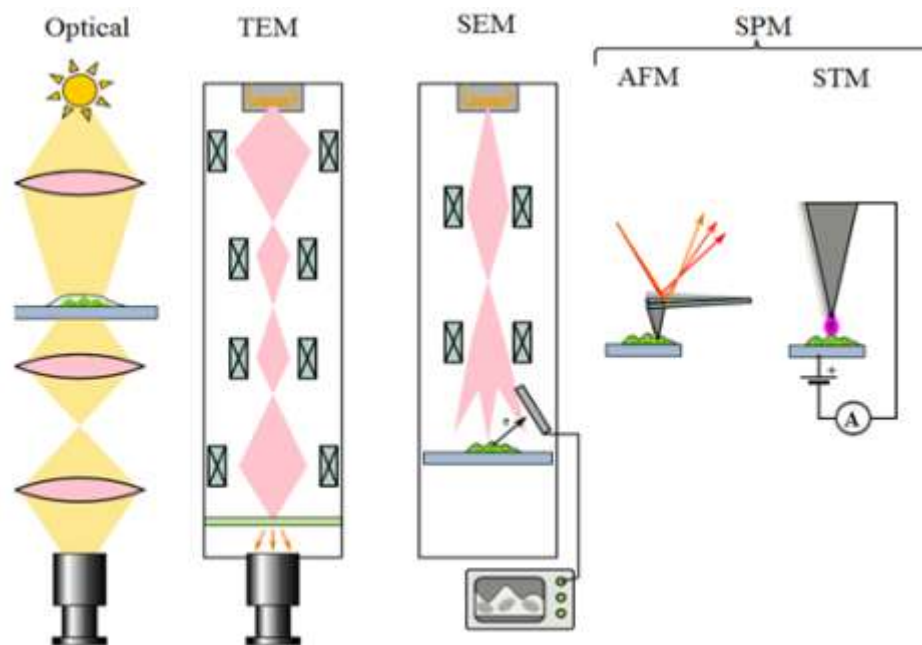
Otros métodos de barrido superficial incluyen al microscopio de fuerza atómica, el microscopio electrónico de barrido y diferentes tecnologías que se desarrollan en la actualidad (microscopía de fuerza química, microscopía por fuerza de resonancia magnética, microespectroscopia fototérmica para citar algunos). Dado que estas se basan en el sistema de barrido, que cuenta con probada resolución lateral, es posible obtener imágenes de muy buena calidad aun cuando el microscopio de efecto túnel sigue siendo el que cuenta con las mejores prestaciones.

Es importante notar que en estos métodos se encuentran limitados por la tecnología actual y no cuentan con un límite teórico de resolución por lo que a futuro se espera que la resolución de los sistemas de barrido continúe mejorando.

Otro aspecto importante de este tipo de microscopía radica en que es posible utilizar estos sistemas para medir superficies orgánicas o biológicas, por lo que estos sistemas devuelven de alguna manera la funcionalidad para los investigadores del área biológica dado que no tienen que disecar y destruir sus muestras para poder observarlas, funcionando tal y como un microscopio óptico pero de resolución mucho mayor.

En la figura 2.1 se observa un diagrama de las tecnologías de microscopía detalladas anteriormente. Entre ellas es importante destacar el microscopio óptico, que tal y como se mencionó, toma una imagen y la amplifica por medio de un sistema de lentes. En

los microscopios electrónicos, el de transmisión (TEM) y el de barrido (SEM), se utilizan haces de electrones para resolver la superficie deseada. En el método de transmisión se envía un haz de electrones a la muestra y midiendo la corriente de electrones transmitidos se logra resolver la imagen, en el SEM por su parte se utiliza un sistema similar pero con los electrones reflejados. Los últimos métodos en la figura (derecha) son los de barrido superficial, en específico el Microscopio de Fuerza Atómica que utiliza fuerzas de van der Waals para realizar las medidas y el STM que utiliza la corriente de túnel entre la punta y muestra para hacer medidas topográficas de la superficie muestreada.



**Figura 2.1: Sistema de microscopía control de la corriente de túnel**

Por último es importante notar que los métodos de microscopía se vieron mejorados de gran manera durante el siglo pasado, dado que en éste se diseñaron los sistemas electrónicos y de barrido, un gran paso luego de siglos de utilizar únicamente los microscopios ópticos con su relativa baja resolución.

## **2.2 Tunelaje Cuántico**

### **2.2.1 Descripción General**

El efecto de tunelaje es un fenómeno cuántico por el cuál una partícula (electrón, átomo u otro) viola los principios de la mecánica clásica al lograr penetrar una barrera de potencial, mayor que la energía propia de la partícula.

Este fenómeno es ampliamente utilizado en la actualidad en variedad de productos electrónicos, desde los diodos de Esaki (diodos túnel), o bien en las memorias flash. Esto dado que con efecto túnel se logran características importantes que no son posibles utilizando características del electromagnetismo clásico.

En el microscopio de efecto túnel, el tunelaje se da entre la punta del microscopio y la superficie muestreada y su intensidad depende de varias variables, entre ellas, la distancia punta-muestra y la densidad de electrones en el punto de medición.

### **2.2.2 Teoría básica de tunelaje**

Dado que el tunelaje en el microscopio se da en un sistema físico, entre el átomo de la punta y los átomos de la superficie muestreada, se presentan potenciales bastante complejos, dado que se introducen potenciales de interacción entre los orbitales atómicos de los átomos interactuantes. Para efectos prácticos se ha desarrollado modelos que simplifican el estudio, entre ellos el modelo de Tersoff-Hamann que simplifica el estudio tomando la punta como un punto y por tanto solo interviene la densidad de electrones en la superficie de la muestra, simplificando de gran manera el cálculo.

En esta sección se hablará del efecto túnel unidimensional para ejemplificar un poco los resultados y compararlos con los obtenidos en análisis tridimensionales más robustos y acertados.

En general lo que se busca es cuantificar la corriente que debe producirse por el efecto de tunelaje entre punta y muestra, por tanto se buscará el coeficiente de transmisión de estos, partiendo de un potencial arbitrario unidimensional  $U(z)$  y de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo. Se tendrá:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2}{dz^2} \psi(z) + U(z)\psi(z) = E\psi(z) \quad (2.2-1)$$

Se tendrán diferentes soluciones dependiendo de si  $E > U(z)$  o si el caso es el contrario. Para el caso  $E > U(z)$  se tendrán soluciones del tipo de onda plana.

$$\psi(z) = \psi(0)e^{\pm ikz} \quad (2.2-2)$$

Donde se tiene el vector de onda unidimensional  $k$  definido de la forma:

$$k = \sqrt{2m \frac{(E-U)}{\hbar}} \quad (2.2-3)$$

Si por el contrario  $E < U(z)$  las soluciones obtenidas serán hiperbólicas decrecientes, de la forma

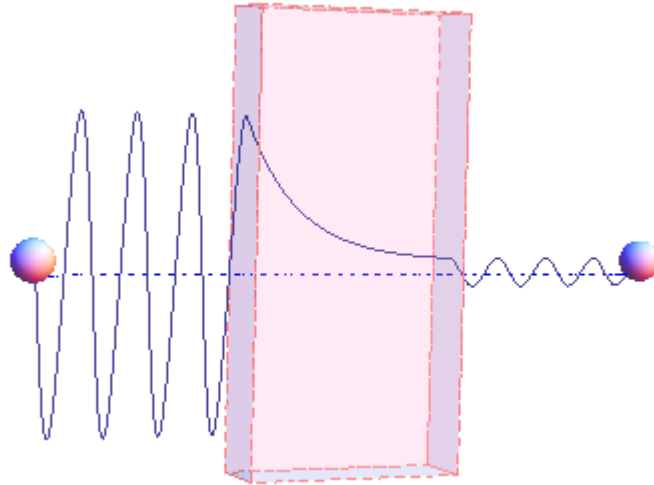
$$\psi(z) = \psi(0)e^{-\kappa z} \quad (2.2-4)$$

Donde se tiene el vector de onda correspondiente  $\kappa$  definido como:

$$\kappa = \sqrt{2m \frac{(U-E)}{\hbar}} \quad (2.2-5)$$

Estos dos casos pueden verse más sencillamente en la figura 2.2, en la que se ve en forma gráfica la función de onda de las partículas. Puede notarse como dentro de la barrera

la función de onda se ve atenuada conforme se ve introducida en esta, al salir de la barrera la onda deja de verse atenuada y continúa con la misma amplitud.



**Figura 2.2: Parte real de la función de onda de una partícula al pasar una barrera**

Ahora, de las expresiones anteriores se puede definir el coeficiente de transmisión que será dado por:

$$T \equiv \frac{I(z)}{I(0)} = e^{-2\kappa z} \quad (2.2-6)$$

Es posible modificar un poco la forma de la constante  $\kappa$  para hacerla dependiente de la función de trabajo de cada material, simplificando la medición y determinación de parámetros. Esto se hace de la forma:

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m\phi}{\hbar}} \approx 5.1\sqrt{\phi(eV)} \text{ nm}^{-1} \quad (2.2-7)$$

La constante  $\kappa$  es conocida como constante de decaimiento y mide cuán fuertemente descende la probabilidad de encontrar un electrón dentro de la barrera de potencial y así la probabilidad de que la atraviese.

La constante  $\phi$  es la altura aparente de la barrera de potencial y ha sido determinada para varios materiales, algunos de ellos se pueden apreciar en la figura 2.1

**Tabla 2.1: Constante de decaimiento y altura aparente de barrera, materiales varios**

<i>Elemento</i>	<i>Al</i>	<i>Au</i>	<i>Cu</i>	<i>Ir</i>	<i>Ni</i>	<i>Pt</i>	<i>Si</i>	<i>W</i>
$\phi(\text{eV})$	4.1	5.4	4.6	5.6	5.2	5.7	4.8	4.8
$\kappa(\text{nm}^{-1})$	10.3	11.9	10.9	12.1	11.6	12.2	11.2	11.2

Debido a la forma de la ecuación de transmisión es posible ver como esta decae fuertemente y por tanto la transmisión de electrones por la barrera sirve como buen sensor de distancia punta-muestra.

### 2.2.3 Conductancia en el microscopio de tunelaje

Teniendo el coeficiente de transmisión resulta necesario calcular la conductancia de tunelaje para poder así, estimar la corriente túnel para cada caso.

Para realizar este análisis, se utiliza una teoría desarrollada por Rolf Landauer, que describe la corriente entre electrodos haciendo dos simplificaciones: la primera radica en que se describe el sistema como un gas de electrones dividido por una barrera cuadrada de potencial y la segunda simplificación dice que la corriente es balística y por tanto, para calcularla, solamente se necesita multiplicar la densidad de electrones por la velocidad de éstos. De esto es posible determinar que la corriente incidente está dada por:

$$I_i = \frac{e^2}{\pi\hbar} V \quad (2.2-8)$$

Donde V es el voltaje aplicado entre la punta y la muestra. Uniendo esta relación con el coeficiente de transmisión de la sección anterior, la corriente transmitida será:

$$I_t = T I_i = \frac{e^2}{\pi\hbar} V e^{-2\kappa(z-z_e)} \quad (2.2-9)$$

Donde  $z_e$  es la posición de equilibrio del sistema, que equivale a una distancia punta- muestra de referencia para el sistema. Ahora, si se divide por el voltaje aplicado se tiene una relación de conductancia, dada por:

$$G = G_0 T = \frac{e^2}{\pi \hbar} e^{-2\kappa(z-z_e)} \quad (2.2-10)$$

Donde se tiene  $G_0 = 77.48 \mu\text{S}$ , esta constante es conocida como “cuanto de conductancia” y equivale a los saltos que es posible obtener en la conductancia de un sistema, al pasar de un átomo a dos átomos (y así sucesivamente) de superficie de contacto.

De manera análoga es posible encontrar el cuanto de resistencia,  $12.91 \text{ k}\Omega$  el cual se ve incrementado de gran manera, al aumentar la separación punta muestra.

$$R = \frac{R_0}{T} = \frac{\pi \hbar}{e^2} e^{2\kappa(z-z_e)} \quad (2.2-11)$$

Esta información es importante dado que nos ayuda a conocer el comportamiento de la corriente de tunelaje con respecto a la variable controlada, la altura en  $Z$ . De esta forma es posible cuantificar la separación punta-muestra y la desviación con respecto a un punto de operación, algo fundamental al diseñar un sistema electrónico de control, como el utilizado en el modo de barrido por corriente constante.

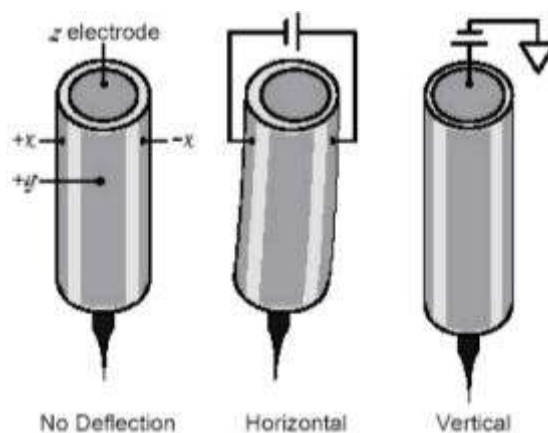


## 2.3 Materiales Piezoeléctricos

### 2.3.1 Descripción General

La piezoelectricidad consiste en el fenómeno que se da en ciertos materiales, en los cuales, al verse sometidos a una fuerza sobre estos, o bien una presión, el material genera un voltaje como respuesta, lo más importante para efectos de este trabajo consiste en el hecho de que los materiales piezoeléctricos, también funcionan de manera inversa, a saber, al aplicársele un voltaje, el material piezoeléctrico se extenderá o contraerá en la dirección correspondiente. Estos materiales fueron descubiertos a finales del siglo XIX y se han utilizado en gran cantidad de aplicaciones en la electrónica.

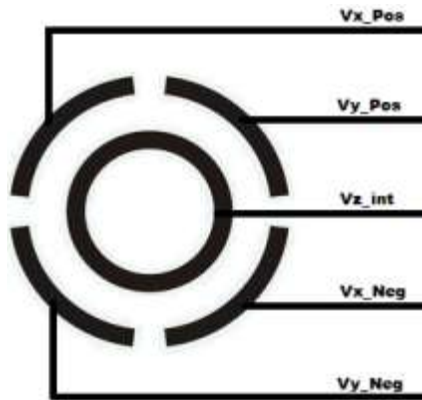
En este experimento el material piezoeléctrico se utiliza como actuador por lo que se le aplicará un voltaje entre sus terminales para lograr que se genere un movimiento en la punta, que irá fijada al piezoeléctrico. De esta forma y utilizando únicamente un cilindro piezo eléctrico será posible realizar movimientos de gran precisión en los ejes X, Y y Z (ver figura 2.3).



**Figura 2.3: Deflexión de un cilindro de material piezoeléctrico.**

### 2.3.2 Características Cilindro Piezoeléctrico

Dado que en este proyecto se utilizará un cilindro piezoeléctrico como actuador, este será el desarrollado en esta sección. Este cilindro cuenta con 5 contactos en él, cuatro en el exterior y uno en el interior. Los contactos externos están divididos en cuadrantes (ver figura 2.4)



**Figura 2.4: Contactos, cilindro piezoeléctrico, vista aérea**

En este cilindro se tienen tres ecuaciones que gobiernan el movimiento de la punta en los tres ejes. Las primeras dos describen el movimiento de la punta en el plano perpendicular a la punta, por tanto en los ejes X y Y, paralelos a la muestra. Se tiene:

$$\Delta X = \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot \Delta V_X}{\pi \cdot ID \cdot d} \quad (2.3-1)$$

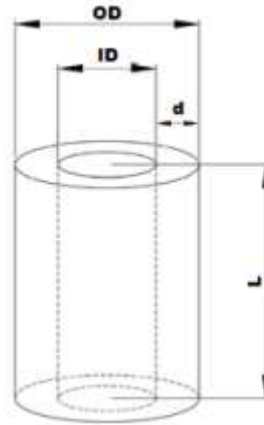
$$\Delta Y = \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot \Delta V_Y}{\pi \cdot ID \cdot d} \quad (2.3-2)$$

Para los movimientos en el eje paralelo a la punta se tiene la tercera relación, que describe por tanto los movimientos en el eje Z del cilindro.

$$\Delta Z = \frac{d_{31} L \cdot \Delta V_Z}{d} \quad (2.3-3)$$

En estas relaciones se utilizan los valores y constantes que se detallarán a continuación.

Los valores  $d$ ,  $ID$  y  $L$ , vienen dados por las medidas físicas del cilindro y puede verse su significación en la figura 2.5.



**Figura 2.5: Medidas propias del cilindro piezoeléctrico**

Por otro lado se tienen los valores del potencial aplicado que se denotan, en este caso como  $\Delta V_{eje}$ , dependiendo del eje a medir se tendrán dos contactos (X y Y) o un solo contacto (eje Z).

$$\Delta V_X = V_{x_{pos}} - V_{x_{neg}} \quad (2.3-4)$$

$$\Delta V_Y = V_{y_{pos}} - V_{y_{neg}} \quad (2.3-5)$$

$$\Delta V_Z = V_{z_{int}} \quad (2.3-6)$$

El último valor es la constante piezoeléctrica ( $d_{31}$ ) que se define como la razón entre el stress obtenido (deflexión) y el campo aplicado. Las características de esta serán desarrolladas en la próxima sección que habla de propiedades físicas del material piezoeléctrico.

### 2.3.3 Propiedades Físicas

Los materiales piezoeléctricos son materiales bastante complejos, con propiedades eléctricas y mecánicas únicas. Propiedades de importancia se explicarán en esta sección, en específico las expresadas en la tabla 2.2. Éstas son de gran importancia para el diseño de un sistema de microscopía de efecto túnel dado que determinan el tamaño de barrido a realizar, el ámbito de temperaturas de trabajo y hasta la disipación de calor del piezoeléctrico y su vida útil. Estos parámetros se describirán a continuación.

Se agregan también los resultados obtenidos para el material y la geometría utilizada en el diseño. Cabe notar que en el proyecto se utiliza el material **BM527** de la compañía canadiense Sensortech que se muestran en negrita en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2: Tabla de constantes importantes de materiales piezoeléctricos**

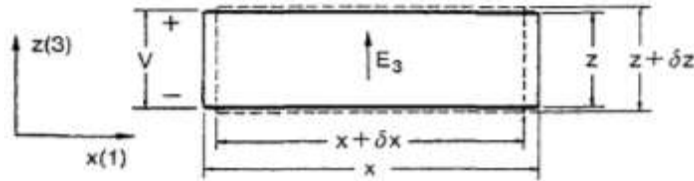
<i>Material</i>	<i>PZT-5A</i>	<i>BM500</i>	<i>PZT-5H</i>	<b><i>BM527</i></b>	<i>PZT-4</i>	<i>unidad</i>
Constante dieléctrica $\epsilon$	1900	1750	3300	<b>2750</b>	1335	--
Constante piezoeléctrica $d_{31}$	-180	-160	-270	<b>-215</b>	-120	$10^{-12}$ pm/V
Factor de calidad mecánica Q	85	80	70	<b>70</b>	500	--
Factor de disipación	2	1.6	2	<b>2</b>	0.2	%
Temperatura de Curie $T_C$	365	360	195	<b>225</b>	325	°C
Módulo de Young Y	6.6	6.5	6.1	<b>6.9</b>	7.7	$10^{10}$ N/m <sup>2</sup>
Densidad $r_{ho}$	7.9	7.65	7.6	<b>7.5</b>	8.1	g/cm <sup>3</sup>

#### Constante Piezoeléctrica

Esta constante relaciona la deflexión generada por el piezoeléctrico al ser sometido a un campo eléctrico. Por tanto, cuenta con unidades de Volt/metro.

$$d_{31} = \frac{S_1}{E_3} = \frac{\delta x}{x} \cdot \frac{1}{E_3} \quad (2.3-7)$$

Los subíndices corresponden a los ejes de aplicación del campo y la medición de la deflexión obtenida, en este caso la deflexión se da en el eje X y el voltaje se aplica en el eje Z. Estas constantes se toman en una sección rectangular de material piezo eléctrico similar al de la figura 2.5.



**Figura 2.6: Método para la determinación de la constante piezoeléctrica**

Esta constante es de gran importancia y es la esencial en la búsqueda de un material piezoeléctrico, dado que si bien es posible variar la forma del cilindro, estos cambios no generan mucha variación como lo puede realizar el cambio del material del cilindro.

### **Constante Dieléctrica**

Los materiales piezoeléctricos cuentan con características de ferroelectricidad, esto genera valores de constante dieléctrica sumamente altos ( $\epsilon_r \sim 10^3$ ). Esto genera ciertos efectos adversos como el tener una curva de histéresis eléctrica que genera desviaciones en los rastreos.

Esta constante dieléctrica viene relacionada con la capacitancia intrínseca del cilindro, que viene dada por:

$$C_{cil} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot \pi \cdot L \cdot OD}{2 \cdot d} \quad (2.3-8)$$

que para el diseño utilizado en el proyecto equivale a 9.9nF.

### **Factor de Calidad Mecánica / Factor de Disipación**

Estos parámetros en conjunto especifican la razón de potencia que se pierde dentro del piezoeléctrico. Cuanto mayor sea, mayor será la vida del dispositivo por lo que materiales como PZT-4 son sumamente estables y son conocidos como materiales piezoeléctricos duros mientras que materiales como el BM527 cuentan con tiempo de vida menor y son conocidos como materiales suaves. Usualmente, para sistemas de microscopía por barrido se utilizan materiales suaves, dado que la potencia trabajada es muy baja.

### **Temperatura de Curie**

De manera análoga a un material ferromagnético, la temperatura de Curie determina la temperatura a la cual, los dominios ferroeléctricos pierden todo orden y la polarización remanente cae a cero. A esta temperatura el material piezoeléctrico deja de funcionar y será necesario polarizarlo de nuevo con campos grandes para poder ser utilizado de nuevo.

Es importante notar que a diferencia de un material ferroeléctrico, el proceso de repolarización no es algo simple de hacer y por tanto bajo ninguna circunstancia debe acercarse al cilindro piezoeléctrico a una temperatura cercana a la de Curie.

En general, la temperatura máxima a la que debe exponerse el material es la mitad de la temperatura de Curie. Así se logrará mantener una buena proporción de la polarización remanente. En el caso del proyecto, no se espera superar la temperatura máxima de la Gran Área Metropolitana por lo que el sistema no debería tener problemas con 30°C o un poco más dado que el BM527 tiene una temperatura de Curie de 225°C.

### Módulo de Young / Densidad

Muchas de las características mecánicas de un material son descritas por estos parámetros. En este caso se utilizan para determinar las frecuencias de resonancia del cilindro piezoeléctrico, dado que ésta representa la velocidad máxima a la cual se pueden hacer mediciones. En general un valor alto de módulo de Young y una baja densidad son deseables para obtener una frecuencia de resonancia alta.

El sistema, al tener dos modos de movimiento, uno paralelo al eje del cilindro y otro perpendicular a este, el cilindro piezoeléctrico tendrá dos frecuencias diferentes de resonancia, estas están dadas por:

#### Frecuencia de resonancia paralelo al eje (estiramiento)

$$f_{para} = \frac{\sqrt{\frac{Y}{\rho}}}{4 \cdot L} \quad (2.3-9)$$

#### Frecuencia de resonancia perpendicular al eje (doblado)

$$f_{perp} = \frac{0.56 \cdot \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \cdot \sqrt{OD^2 + (OD-d)^2}}{8 \cdot L^2} \quad (2.3-10)$$

En el caso de este proyecto se tendrán frecuencias de resonancia de 30kHz para el estiramiento y 3kHz para doblado.

Es importante notar que este valor no es fácil variarlo por medio de escogencia de material dado que los factores de densidad y módulo de Young no varían de gran manera entre las cerámicas piezoeléctricas. Por tanto resulta mejor modificar las dimensiones físicas del cilindro para variar las frecuencias de resonancia.

## 2.4 Consideraciones de Ruido

### 2.4.1 Descripción general

En electrónica, el ruido consiste en una perturbación de un voltaje con respecto a un valor preestablecido. Esta perturbación es completamente estocástica y el sistema no tiene injerencia sobre éste. Por esta razón en todo sistema digital o analógico se buscan métodos para minimizar el ruido o bien mejorar la relación señal a ruido del sistema.

Si bien el ruido electrónico es el de mayor influencia en los sistemas electrónicos, también es necesario considerar el ruido mecánico dado que como la punta del microscopio debe estar sumamente cerca de la superficie a muestrear, es necesario que no haya vibraciones que provoquen colisiones y se estropeen las mediciones. Por tanto en esta sección se desarrollaran de los tipos de ruido electrónicos y de sistemas de aislamiento de ruido mecánico.

### 2.4.2 Ruido Electrónico

En el ámbito electrónico se tienen dos fuentes de ruido: el ruido de Johnson o ruido térmico y el ruido electromagnético producido por la radiación absorbida por el sistema.

#### Ruido de Johnson

El ruido de Johnson o ruido térmico se produce debido al movimiento de los electrones dentro de la resistencias y por tanto es de gran importancia para el microscopio en la primer etapa de amplificación de transimpedancia. La potencia de este ruido viene dada por la relación:

$$P = 4K_BTB \quad (2.4-1)$$



donde T es la temperatura, B el ancho de banda de frecuencia a trabajar y  $K_B$  la constante de Boltzmann. Esta potencia se puede separar en voltaje y potencia de Johnson dadas por:

$$V_{rms} = \sqrt{4K_B T R B} \quad (2.4-2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{4K_B T B}{R}} \quad (2.4-3)$$

Cabe notar que el valor pico a pico del ruido es en promedio 8 veces el valor RMS, por lo cual se tendrán valores estocásticos altos de ruido aún y cuando en general no se tenga un ruido considerable.

La corriente de ruido térmico es posible minimizarla utilizando una resistencia de mayor valor. Esto resulta favorable excepto por el hecho que el sistema cuenta con una capacitancia intrínseca, y por tanto se genera un tiempo de retardo de  $R_T C_{FB}$  en la etapa de amplificación.

Al contar con esta capacitancia intrínseca el sistema de amplificación mostrará una función de reacción de la forma:

$$V_{out} = R_{FB} I_{IN} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_T C_{FB}}\right) \right] \quad (2.4-4)$$

Lo cual representa la curva de reacción de un sistema con un polo en  $R_T C_{FB}$ .

Para el caso del proyecto actual, se utilizará una resistencia de 100 M $\Omega$  que cuenta con una capacitancia intrínseca de alrededor de 10pF, por lo que se obtiene un retardo de 1ms que impone un límite de funcionamiento al sistema de rastreo de 1000Hz, que es razonable para este caso.

### **Ruido Electromagnético**

Este ruido es provocado por la radiación electromagnética a la cual es sometido el sistema de microscopía, la radiación viene dada por las emisoras radiales, celulares y demás sistemas de transmisión eléctrica que provocan interferencia dado que en general cualquier material metálico funciona como una antena incipiente.

La manera más simple utilizada en este experimento es desarrollar una Jaula de Faraday que bloquee la radiación incidente. Estas jaulas consisten en cajas metálicas de suficiente espesor para no dejar que se introduzca ninguna onda electromagnética. El espesor mínimo para metales es de alrededor de  $60\text{\AA}$  por lo que cualquier recubrimiento metálico de más de  $10\text{nm}$  funciona como una buena jaula de Faraday.

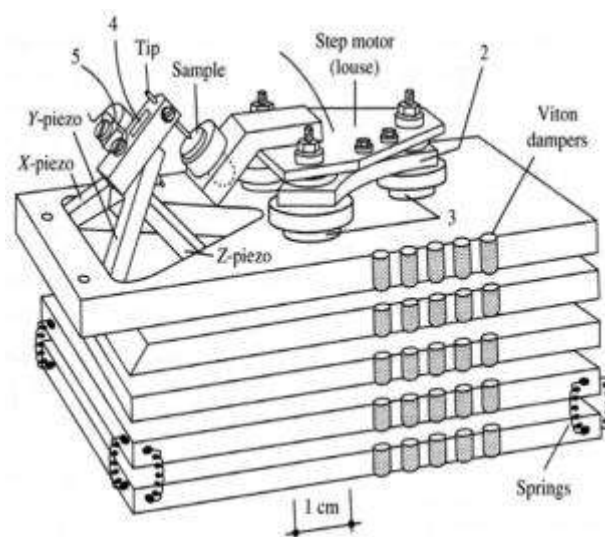
### **2.4.3 Ruido Mecánico**

El ruido mecánico, para efectos de este proyecto, se refiere a cualquier vibración mecánica que se genere en el cuerpo del microscopio. Estas vibraciones dependen del material del que esté hecho el microscopio y de sus características mecánicas.

Al entrar en contacto el microscopio con vibraciones producidas por sonidos, movimientos, etc. este comenzará a oscilar con patrones de vibración propios de la geometría del microscopio. Al hacer esto, el microscopio comenzará a moverse con ondulaciones propias del sonido, que alejarán o acercarán la punta de medición a la superficie analizada. Esto no es deseable porque las vibraciones son efectos estocásticos que no son predichos por el diseño. Por tanto para evitar que haya choques entre la punta y la muestra, se utilizará un sistema de capas alternadas de aluminio y hule para atenuar las vibraciones que puedan entrar al microscopio.

De esta manera, el microscopio se verá separado mecánicamente del ambiente y por tanto se logrará que las vibraciones no penetren en las mediciones. Así se mejora de gran manera las posibilidades de rastreo en el sistema.

El sistema a utilizar es similar al de la figura 2.7, donde se pueden ver las capas de aluminio con espaciadores de hule en medio que funcionan como amortiguadores de la oscilación, por otro lado también cuenta con resortes que sirven el mismo fin pero en el caso actual no se consideran necesarios.



**Figura 2.7: Sistema de aislamiento mecánico**

## 2.5 Sistemas de Control

### 2.5.1 Descripción General

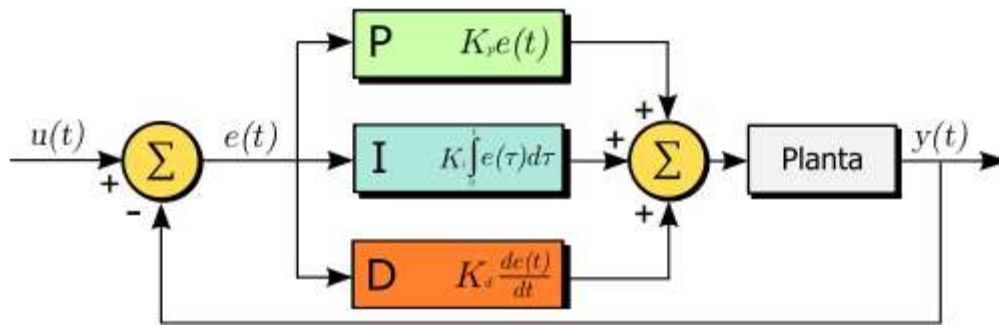
Los sistemas de control son sistemas que buscan mantener a una aplicación en un ámbito de trabajo estable y deseado, además de ser un sistema capaz de modificar este punto de funcionamiento a pedido del usuario.

Existen varios diferentes sistemas de control, el utilizado en este proyecto es conocido como SISO-LIT (Una entrada una salida lineal invariante con el tiempo). En estos sistemas, como su nombre lo dice se tiene una entrada y una salida y se supone que los parámetros de la planta a controlar no varían con el tiempo.

Esta descripción describe a la mayoría de los sistemas y aplicaciones analógicas y por tanto son de gran utilidad en la industria.

Los controladores utilizados en este tipo de aplicaciones deben ser continuos y depender del punto de funcionamiento y de la salida de la aplicación a utilizar. Para estos sistemas existen varios sistemas de control pero el más utilizado al ser una señal continua es el de tipo PID (Proporcional Integral Derivativo), en este se utiliza la *Salida* ( $y(t)$ ) de la planta y el *Valor Deseado* ( $u(t)$ ) para generar una señal de *Error* ( $e(t)$ ) que luego es introducida a los módulos de control PID, en los cuales se tiene uno que genera una salida proporcional al valor de error, otro una salida proporcional a la integral del error y por último otro proporcional a la derivada del error. Por último la salida de estos tres módulos se ve sumada y se pone a la entrada del *Proceso* a controlar, a la salida de este proceso se tiene la *Salida* que se utiliza de nuevo para generar la señal de error y así continuamente,

por esto es conocido como un proceso de lazo cerrado o bien realimentado, al utilizar la salida para controlar la entrada del sistema. En la figura 2.8 se tiene un diagrama de bloques del sistema de control tipo PID descrito anteriormente.



**Figura 2.8: Diagrama de Bloques controlador PID**

Normalmente en el diseño del sistema de control no es necesario la utilización de los tres bloques, en específico a menos de que una respuesta muy rápida sea necesaria el bloque Derivativo usualmente no es muy necesario dado que es muy sensible al ruido y puede, en situaciones propensas al ruido generar problemas.

Matemáticamente, en el espacio de Laplace, la salida del controlador viene dada de la forma:

$$Y(s) = H(s) \left\{ K_p E(s) + K_I \frac{E(s)}{s} + K_D [sE(s) - e(0)] \right\} \quad (2.5-1)$$

$$\text{Con} \quad E(s) = U(s) - Y(s) \quad (2.5-2)$$

Donde  $H(s)$  es la función de transferencia de la aplicación a controlar y es posible identificarla mediante métodos varios. Esta función es posible manipularla un poco para obtener una función más útil (ecuación 2.5-3).

$$Y(s) = \frac{H(s)}{s} \{ s^2 K_D E(s) + K_P s E(s) + K_I E(s) \} \quad (2.5-3)$$

Con esta es posible movilizar los ceros de la función y así lograr eliminar polos de la función de la planta ( $H(s)$ ) y así lograr mejorar de gran manera la eficiencia de la planta.

Es posible volver al espacio temporal para verificar la forma de la función en este espacio, para esto se realiza una transformada inversa de Laplace a la ecuación 2.5-1.

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau) \left( K_p e(\tau) + K_i \int_0^\tau e(\tau_2) d\tau_2 + K_e \frac{d}{dt} e(\tau) \right) d\tau \quad (2.5-4)$$

$$\text{Con} \quad e(t) = u(t) - y(t) \quad (2.5-5)$$

Con esta función es posible dar un estimado a la curva de reacción del sistema ante un impulso del sistema de control o bien del valor deseado dado por el usuario.

### 2.5.2 Proyecto actual

En el proyecto actual se busca mantener un valor de referencia de corriente de túnel estable, para esto es necesario que el sistema aplique un voltaje dado al cilindro piezoeléctrico, este voltaje hará que el cilindro se estire o bien se encoja acercando a alejando la punta, este voltaje debe mantenerse estable cuando ya se obtenga un error mínimo, por tanto el controlador que debe utilizarse es de tipo integral, dado que recuerda, por así decirlo los errores que se han tenido a lo largo del tiempo y por tanto aleja o acerca la punta y cuando ya el error se minimiza, mantiene el valor de voltaje, esto no lo hace ni un controlador proporcional y mucho menos uno derivativo.

Sin embargo, el adicionar un controlador proporcional logra mejorar los tiempos de asentamiento de la señal y por tanto dar un sistema de control más efectivo, este es esquema es el utilizado en este proyecto dado que mejora la eficiencia del sistema

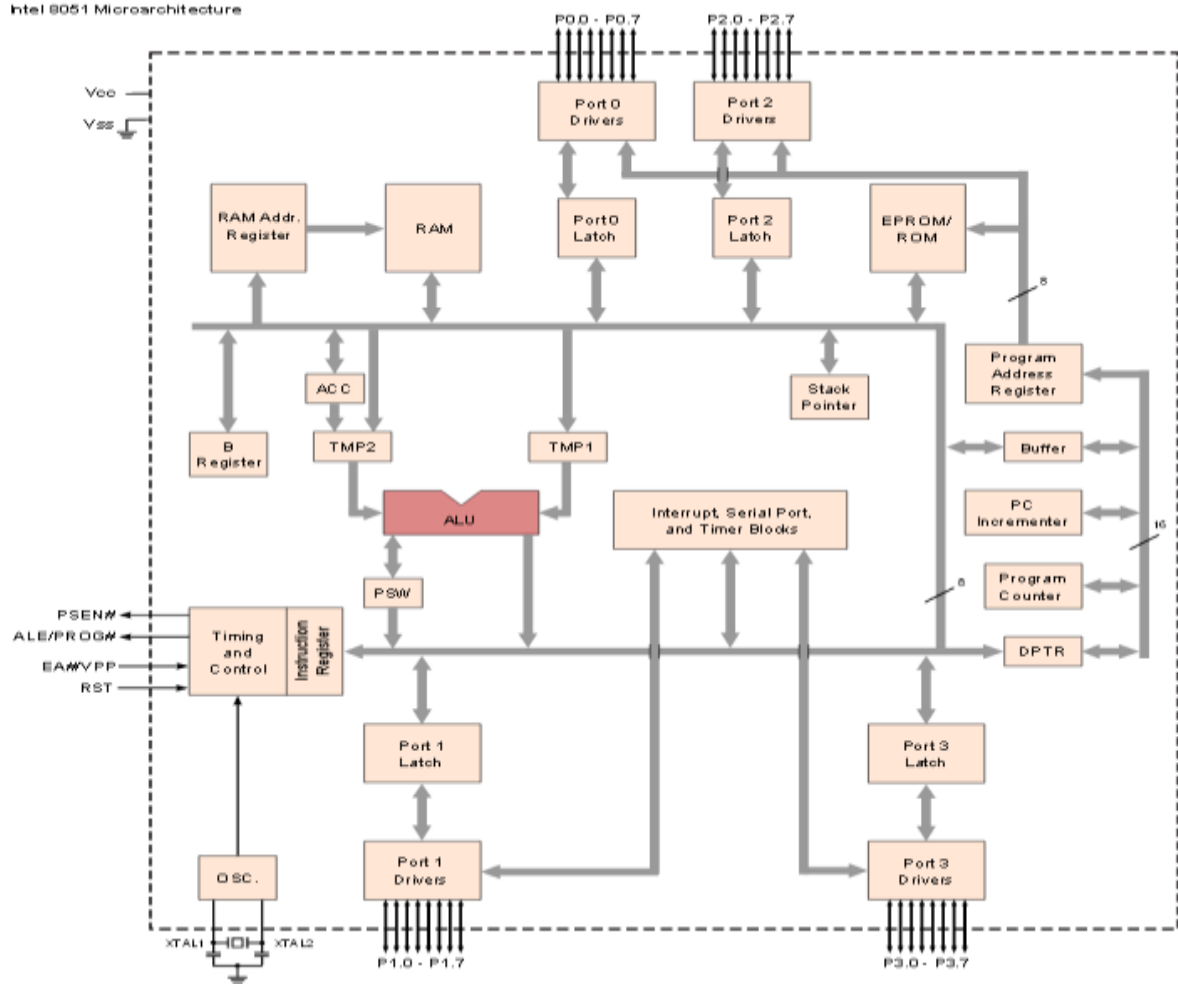
## **2.6 Microcontrolador 8051**

### **2.6.1 Descripción general**

El Microcontrolador 8051 fue desarrollado en 1980 por Intel a manera de introducirse en el mundo de los sistemas embebidos, cuenta con una microarquitectura bastante simple y robusta y por tanto modelos similares han sido desarrollados por más de 20 compañías diferentes, entre ellas Texas Instruments que desarrolla el sistema utilizado en este experimento. Este Microcontrolador se basa en la microarquitectura del tipo Harvard y por tanto existen espacios de direccionamiento separados para código y datos. Debido a desarrollos en el diseño y modificaciones pequeñas en la forma de localizar memoria, el Microcontrolador ha llegado a ser capaz de controlar 64kB de RAM y ROM separados, algo bastante considerable para un Microcontrolador de 8 bits.

Su memoria interna se encuentra dividida en dos jerarquías: los SFRs (Special Function Registers) por un lado y la memoria de propósito general. Los SFRs son registros propios del Microcontrolador con posiciones de memoria establecidas desde el momento del diseño del 8051, por su parte la memoria de propósito general es utilizable por el software en el modo que este desee.

En cuanto a periféricos, el 8051 cuenta con gran cantidad, debido a que mediante hardware ha sido posible utilizar el espacio propio de los SFRs para controlar sistemas como convertidores Analógico Digital, Digital a Analógico, sistemas de transmisión serial (UART), cuatro puertos digitales de 8 bits, temporizadores normales y de tipo tiempo real entre muchas otras aplicaciones. Un esquema del 8051 se muestra en la figura 2.9.



**Figura 2.9: Diagrama de bloques del Microcontrolador 8051 básico.**

Algo importante de hacer notar es que este Microcontrolador asienta las bases del desarrollo de microcontroladores, por esta razón existen muchos tutoriales y software de compilación libres que hagan posible la utilización de este Microcontrolador sin necesidad de invertir grandes sumas de dinero para utilizarlo.

### 2.6.2 Texas Instruments MSC1211Y5

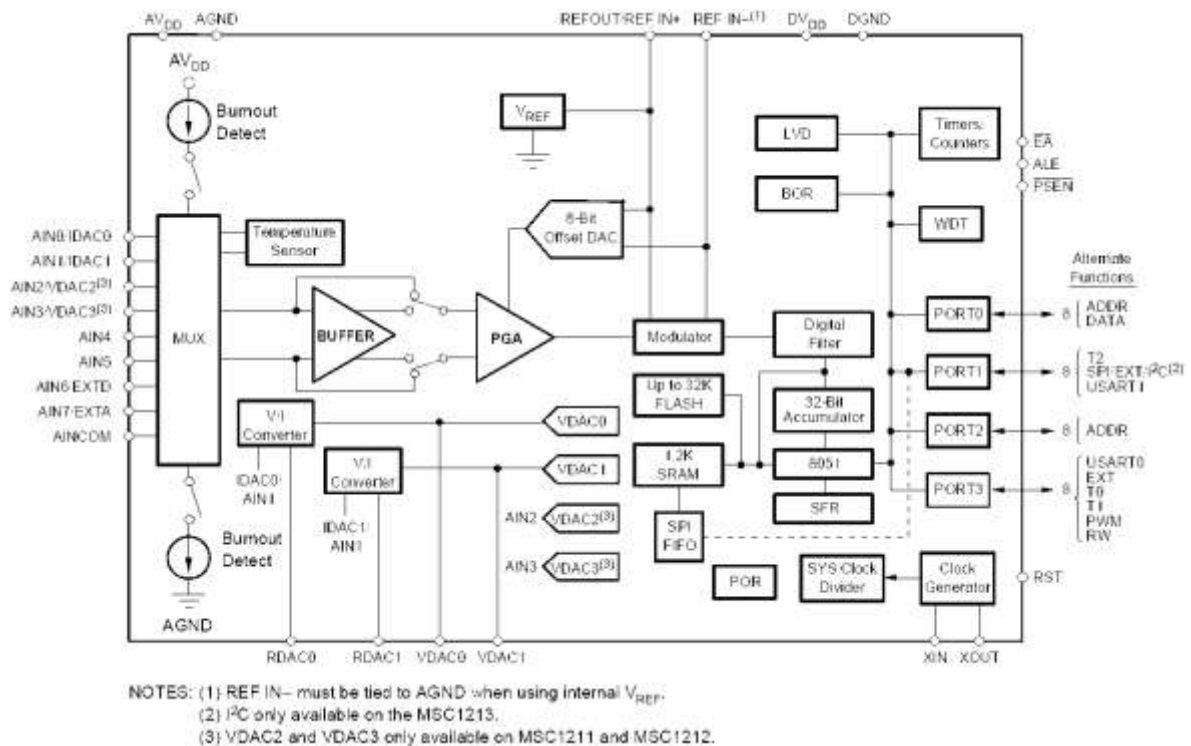
Este Microcontrolador es el utilizado en el presente proyecto. Corresponde a una versión mejorada y ampliada del 8051 básico dado que se le ha mejorado la unidad



ejecutora, pasando de 12 ciclos por instrucción en el 8051 básico a 3 ciclos por instrucción en el MSC12XX, una triplicación de la velocidad real de procesamiento.

Este Microcontrolador fue desarrollado con la idea de desarrollar un convertidor de señales y por tanto cuenta con una alta cantidad de puertos digitales pero también puertos analógicos de gran precisión lo que lo convierten en un sistema de alta utilidad para el desarrollo de sensores o sistemas de medición en general.

Un diagrama general de MSC12XX se encuentra en la figura 2.10 y puede verse que cuenta a diferencia del 8051 con unidades de conversión de datos y otras funcionalidades.



Las características más importantes de este sistema son sus puertos de conversión digital a analógico de 24 bits que da un ámbito de resolución mayor a los 16 millones de niveles sumamente alto al compararse con el convertidor de 256 niveles utilizado en los primeros microscopios de efecto túnel. Con esta resolución se tiene un ruido de  $0.3\mu\text{V}$ , considerando un ámbito de medición de 5V. Por su parte el sistema también cuenta con convertidores Digital a Analógico de 16 bits de resolución que equivale a más de 65mil niveles de cuantización o bien escalones de  $76\mu\text{V}$ .

Estos dos sistemas son de gran utilidad para desarrollo del microscopio de efecto túnel, dado que las mediciones de voltaje en el piezoeléctrico y corriente de tunelaje son realizadas por el convertidor analógico digital y el barrido superficial, junto con los voltajes de bias y corriente de referencia son suministrados por los puertos de conversión digital a analógico.

Este es el único Microcontrolador en el mercado con estas características de conversión de datos y por tanto fue el escogido para este experimento, dado que da prestaciones de suma calidad para el proyecto. Si no se hubiese podido utilizar éste hubiera sido necesario utilizar sistemas de comunicaciones más avanzados para poder controlar por interfaz serial diferentes sistemas de conversión de datos a la computadora o bien un Microcontrolador central, proceso que hubiese sido bastante más complicado.

## **CAPÍTULO 3: Diseño General**

El diseño del microscopio de efecto túnel divide el trabajo en tres áreas completamente separadas: la eléctrica, la mecánica y la programática. La primera consiste en realizar los sistemas de amplificación de voltaje, control del movimiento de la punta de barrido y disminución de los voltajes para poder realizar una buena conversión analógica a digital de las señales. Junto a esto se presenta la necesidad de tener un sistema de aislamiento electromagnético para evitar fuentes de ruido innecesarias para el sistema.

### **3.1 Diseño Electrónico**

En el campo electrónico, se diseña un microscopio de efecto túnel con características prácticas de interés; este microscopio cuenta con la capacidad de modificar el ámbito máximo de barrido, el sistema de amplificación, dos modos de funcionamiento, de corriente y altura constante y un sistema de control del tipo PID paralelo. Este sistema será denominado sistema completo a diferencia del sistema que se implementará físicamente en este proyecto.

El sistema a implementar es un microscopio de efecto túnel básico, que funciona únicamente en el modo de altura constante, el de mayor utilidad, junto a esto cuenta con ámbito de barrido constante, un único sistema de amplificación de corriente y un controlador del tipo PI paralelo. Si bien este sistema no cuenta con ciertas funcionalidades del sistema completo el modelo implementado es completamente funcional y las características no incluidas no modifican el funcionamiento dado que correspondían redundancias en el diseño y no correspondían a partes fundamentales del mismo.

Teniendo esto en cuenta se continuará explicando el sistema completo diseñado parte por parte para poder explicar las decisiones tomadas en cada caso. Al finalizar esta explicación, se expondrá el sistema implementado y se contrastará con el sistema completo, para hacer notar las partes que no se implementan en este sistema.

### 3.1.1 Amplificación de corriente

Se comienza con el sistema de control del eje Z del microscopio donde la primera etapa es el sistema de amplificación de transimpedancia, que sigue el funcionamiento de la primera etapa de la figura 3.1, en esta se utiliza una resistencia de entre  $100\text{M}\Omega$  y  $1000\text{M}\Omega$ . Para generar una amplificación de un factor de  $10^8$  o bien  $10^9$  con respecto a la corriente de entrada, esto dado que el amplificador de transimpedancia amplifica corriente y la convierte en voltaje, según la relación:

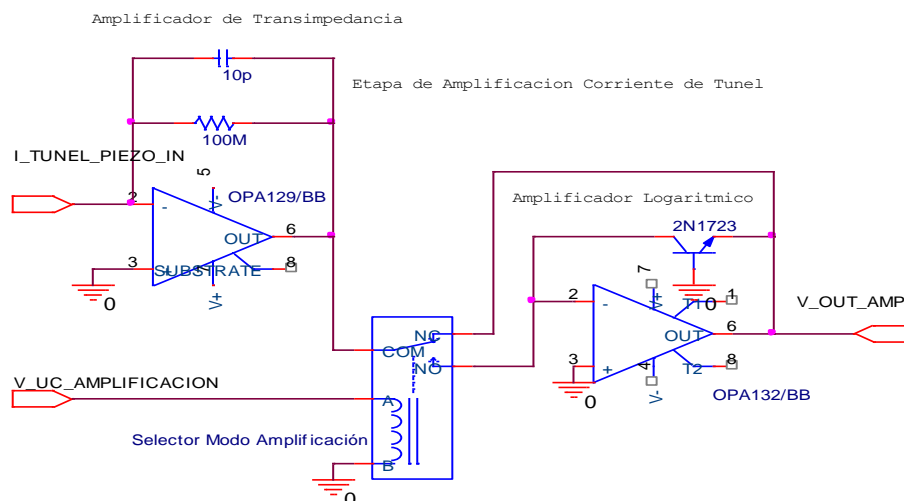
$$V_{out} = -R_T \cdot I_{tunnel} \quad (3.1-1)$$

Es importante notar que dado que el sistema de amplificación sigue la relación 2.4-2, el valor 3.1-1 equivaldrá a la respuesta en estado estacionario del amplificador pero al tener cambios en la señal se tendrá la respuesta transitoria

$$V_{out} = -R_T \cdot I_{tunnel} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_T C_{FB}}\right) \right] \quad (3.1-2)$$

Por tanto dado que el sistema cuenta con una capacitancia parasita proveniente del cilindro piezo eléctrico de aproximadamente  $10\text{nF}$ , que representa un tiempo muerto de  $1\text{ms}$  para el caso de la resistencia de  $100\text{M}\Omega$  y de  $10\text{ms}$  para el caso de la resistencia de  $1000\text{M}\Omega$ . Esto debe tomarse en cuenta al realizar el barrido dado que siempre debe utilizarse un tiempo de muestro en cada pixel mayor al tiempo muerto del sistema, mejor

aún si se pueden tener 2 o 3 tiempos muertos para el barrido dado que le da tiempo de asentarse al amplificador.



**Figura 3.1: Etapa de amplificación completa**

Para esta etapa deben considerarse varias estrategias de minimización de ruido en el sistema, la primera consiste en la necesidad de utilizar un amplificador operacional con una corriente de bias muy baja, dado que la corriente de tunelaje está en el orden de los nano-Ampere, por esto en este caso se utiliza el amplificador OPA129 de Texas Instruments (suministradas por esta compañía sin cargo para el desarrollo del experimento) que cuenta con una corriente de bias de 30fA (5 órdenes de magnitud menor a la corriente de trabajo), un offset de 2mV y un ruido de  $15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  a 10kHz, esto garantiza que el sistema de amplificación funcione de satisfactoriamente en el ámbito de amplificación del sistema de tunelaje y por tanto el análisis de ruido recae en otras fuentes.

Junto a este amplificador se utilizan resistencias de tolerancia muy baja, 0.5% proporcionadas por la compañía Ohmite para el experimento.

Teniendo esto desarrollado resulta de importancia diseñar un sistema de aislamiento de ruido electromagnético, dado que al trabajar con corrientes tan bajas, la radiación electromagnética puede influir de mala manera en el sistema creando corrientes de Eddy o similares, este sistema se desarrollará en la sección 3.1.10. También para evitar la presencia de ruido en el sistema es necesario minimizar la distancia entre la interfaz donde se genera el tunelaje (interfaz punta-muestra) y la entrada al sistema de amplificación, para esto se posicionará el amplificador de transimpedancia sobre la cabeza del microscopio, esto minimiza el ruido y también el tamaño del sistema de aislamiento electromagnético.

Ahora, dado que el sistema completo cuenta con la habilidad de contar con dos modos de amplificación de corriente, uno normal y otro logarítmico, la etapa de amplificación continua con un amplificador logarítmico luego de la etapa de amplificación de transimpedancia y utiliza un relay para escoger que tipo de amplificación utilizar, cabe notar que la amplificación normal utiliza la salida del amplificador de transimpedancia como salida de la etapa de amplificación mientras que la logarítmica toma la tensión a la salida del segundo amplificador. La etapa de amplificación se muestra en la figura 3.1.

### **3.1.2 Sistema de Control**

En esta etapa se procede a realizar control sobre la distancia punta-muestra mediante un controlador PID que toma la señal de la etapa de amplificación y se lo resta a una corriente de referencia para generar una señal de error que luego es amplificada, integrada o derivada según el amplificador utilizado. Por último la salida de estos tres bloques es sumada en un amplificador salida de ganancia variable, que se utiliza como un coeficiente de amplificación mutuo para los tres bloques de control.

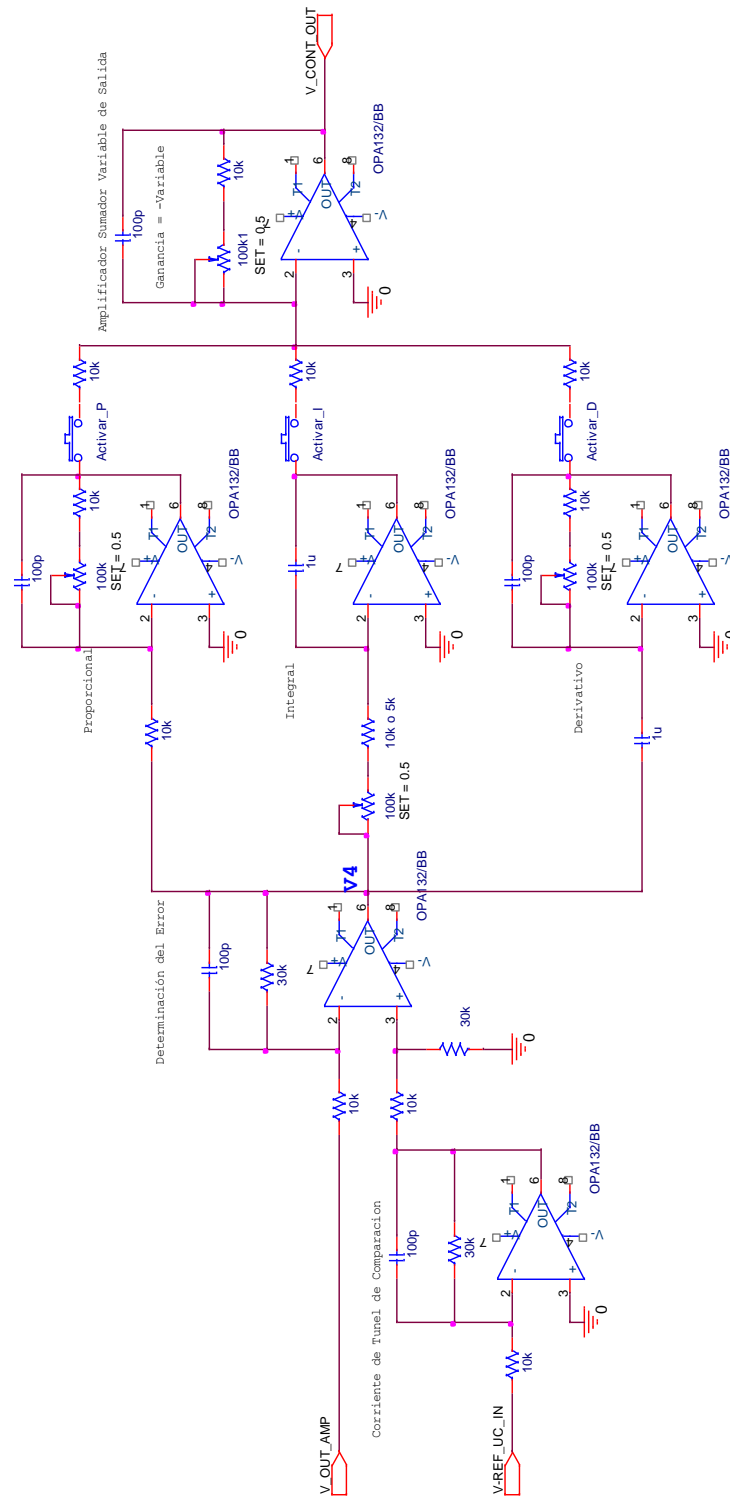


Figura 3.2: Sistema de control

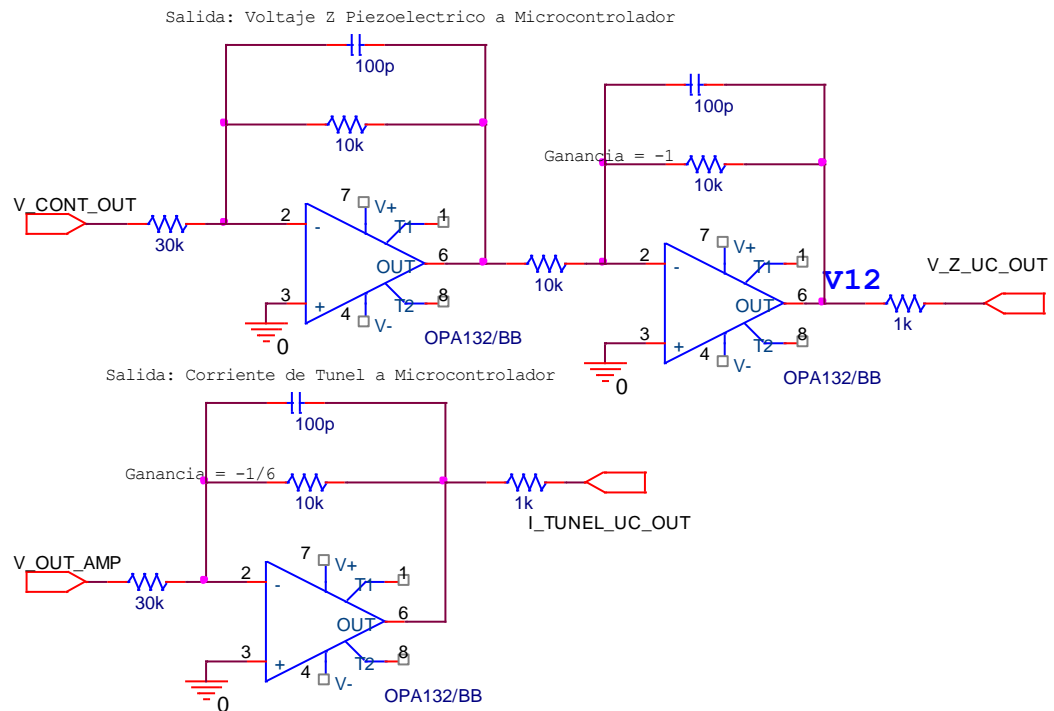




La salida de esta etapa se conecta al contacto interior del piezoeléctrico que mueve la punta en el eje Z acercando y alejando la punta a la superficie barrido, debe notarse que dado que no se tienen dos contactos para este eje el ámbito de movimiento del sistema es menor que para los ejes X y Y.

### 3.1.4 Amplificación para adquisición de datos

Para poder obtener lecturas del sistema de microscopía es necesario disminuir el voltaje a un nivel que el convertidor analógico-digital logre resolver, para esto se utiliza un sistema de minimización de voltaje que toma los voltajes del sistema y los divide por un factor de 6 para obtener un voltaje manejable por los convertidores, estos esquemas vienen dados en la imagen 3.4 y son utilizados para hacer las lecturas de corriente de tunelaje y el voltaje de salida del sistema de control.

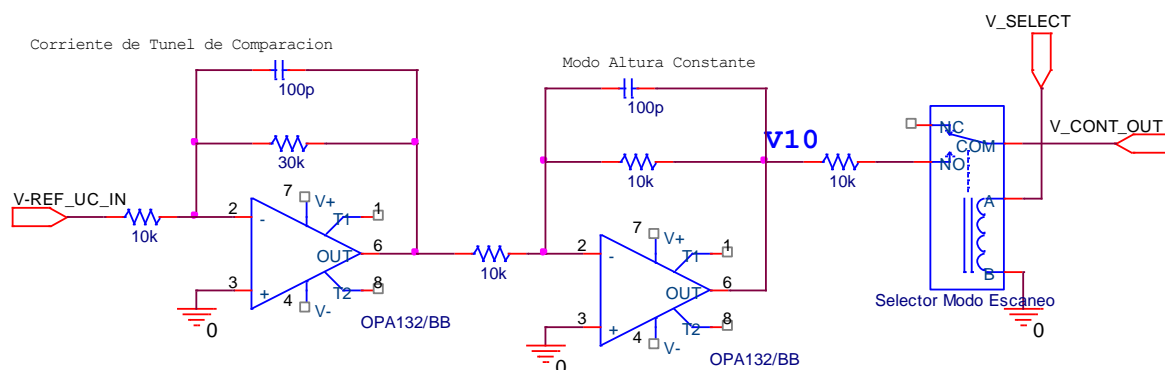


**Figura 3.4: Amplificación para adquisición de datos**

### 3.1.5 Modo de altura constante

El desarrollo anterior es aplicable únicamente para el modo corriente constante, en el modo de altura constante, es necesario implementar algunos cambios, en específico, se toma el valor de corriente de referencia como voltaje para el eje Z del piezoeléctrico y para esto pasa por un amplificador inversor que luego entra a la etapa de amplificación del voltaje del eje Z y funcionar de la manera deseada.

Para escoger entre los modos, se utiliza un relay en el cual la entrada normalmente cerrada se introduce conecta la salida del sistema de control proveniente del modo de corriente constante y en el pin normalmente abierto se posiciona la salida del inversor para escoger uno u otro modo de barrido, este sistema viene esquematizado en la figura 3.5.



**Figura 3.5: Modo de altura constante**

### 3.1.6 Eje Z completo

En la figura 3.6 se incluye el esquemático completo que comprende las secciones descritas anteriormente y por tanto la totalidad del sistema que se conecta al eje Z del piezoeléctrico utilizado.

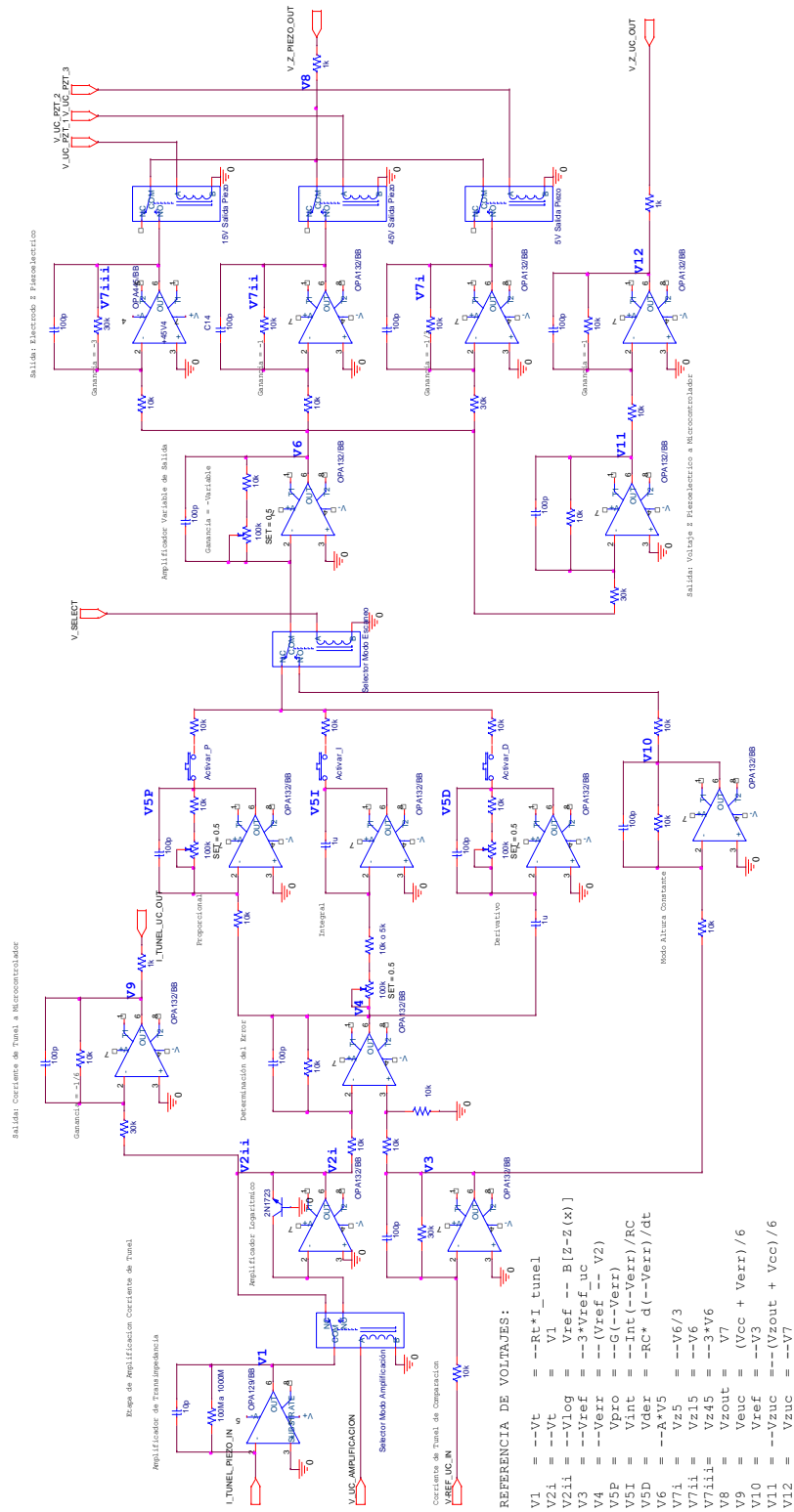


Figura 3.6: Eje Z sistema de microscopía completo

### 3.1.7 Amplificación ejes X y Y

Saliendo del eje Z, también es necesario utilizar un sistema de amplificación para los valores provenientes de los DACs del microcontrolador que pretenden realizar el barrido bidimensional de la superficie a barrer.

Considerando que el microcontrolador cuenta con una alimentación de 5Vdc, se tendría un voltaje bastante limitado y por esto se desarrolla el sistema de amplificación que logra pasar de estos 5V a 180V dependiendo del modo de amplificación utilizado. A continuación se detalla este sistema.

La primera etapa de la amplificación (preamplificación) escoge entre valores de voltaje siempre positivos, en donde el sistema contará con valores de salida positivos y logrará un ámbito máximo de salida de 90V. Este modo sigue la relación.

$$V_{amp} = -3 * V_{xuc_{in}} \quad (3.1-3)$$

Para el segundo modo de preamplificación se resta  $V_{cc}/2$  al valor dado por el microcontrolador y se amplifica por 6 este valor. Este modo logra un ámbito máximo de amplificación de 180V y sigue la relación.

$$V_{amp} = -6 * (V_{xuc_{in}} - V_{cc}/2) \quad (3.1-4)$$

La selección de este modo de preamplificación se realiza mediante un relay de activación y ayuda a mejorar el ámbito de funcionamiento del sistema, dado que con este sistema de amplificación se podrá barrer superficies de hasta  $6.5\mu\text{m}$  de ancho, utilizando únicamente amplificadores de 45V de alimentación.

Posterior a la selección del modo de amplificación se procede a aumentar o decrementar el voltaje y es en esta sección donde se pasa de una señal de  $\pm 15V$  a una de  $\pm 5V$ ,  $\pm 15V$  o bien  $\pm 45V$  dependiendo del amplificador operacional que se desee utilizar.

Este sistema es versátil y logra un factor de amplificación de hasta 36 veces al utilizar los amplificadores de  $45V$ , 12 veces con los amplificadores de  $15V$  y 4 veces con los de amplificadores de  $5V$ .

Se puede notar por tanto que al utilizar este sistema es posible variar el ámbito de trabajo del sistema y lograr así mejorar la precisión del sistema utilizando el modo de amplificación 1 y el ámbito de  $5V$  o bien se puede barrer una amplia superficie con el modo 2 y el ámbito de  $45V$ .

A futuro se espera poder utilizar amplificadores de alto voltaje ( $\pm 150V$  o más) dado que con amplificadores de este voltaje y haciendo uso de las facilidades del circuito de preamplificación es posible cuadruplicar el voltaje efectivo de barrido y en el caso de contar con amplificadores bipolares de  $\pm 150V$  sería posible barrer superficies de alrededor de  $22\mu m$  lo que mejora de gran manera las capacidades del sistema de barrido actual.

Cabe notar que este esquema variable de amplificación es posible implementarlo en el sistema para el eje Z a manera de poder también aumentar también el ámbito de deflexión en este eje. Para el caso de amplificadores de  $\pm 150V$  pasaría a  $2.5\mu m$ , 10 veces mayor al valor posible con amplificadores de  $15V$ , de  $252nm$ .

El problema de estos amplificadores es la realización de una fuente simétrica de alto voltaje DC que no es algo simple de implementar, junto al hecho de los peligros inherentes de trabajar con alto voltaje.

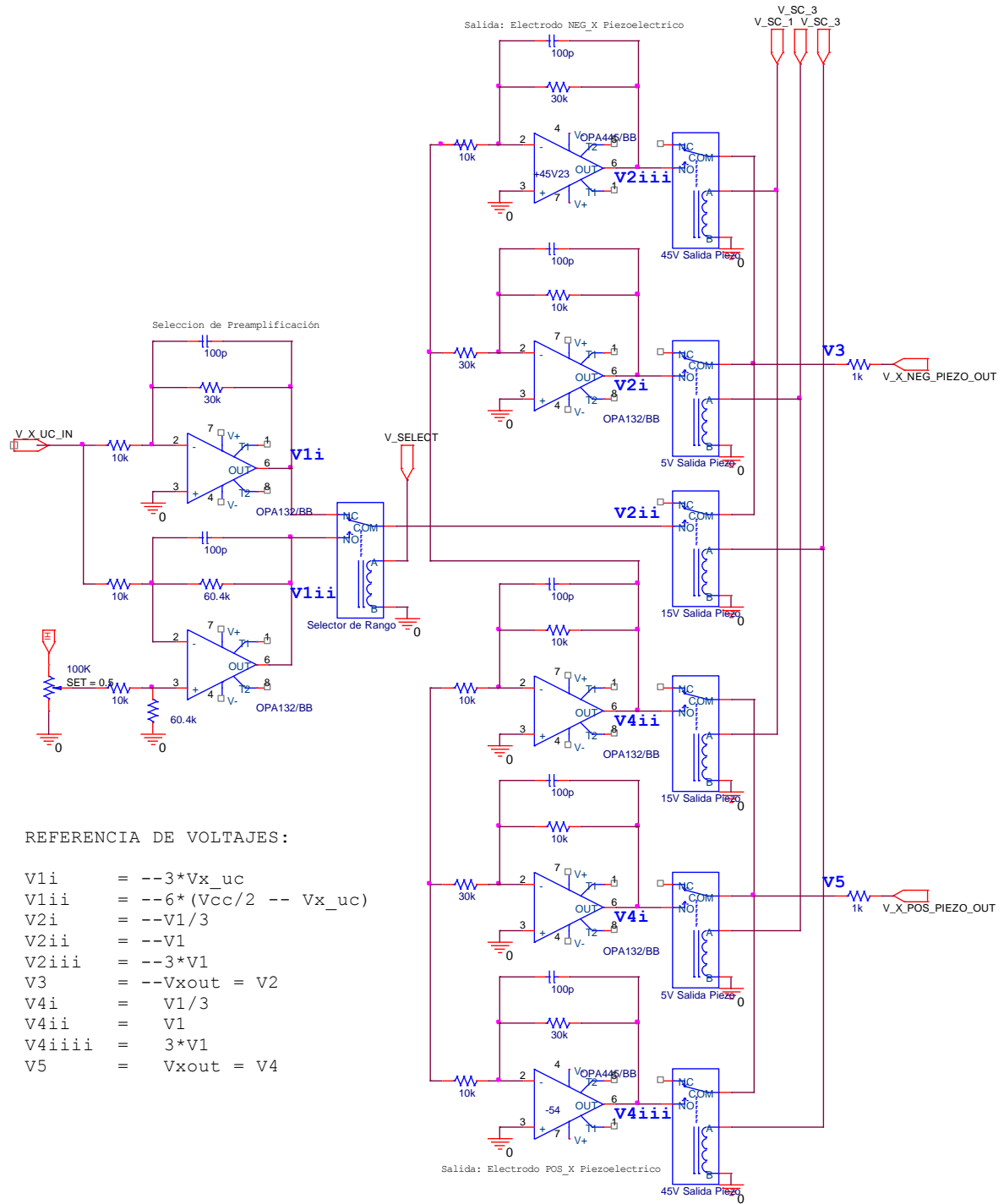


Figura 3.7: Amplificación ejes X y Y

### **3.1.8 Bias de tunelaje**

El último sistema electrónico de importancia es el sistema que implementa el voltaje de bias para el sistema, dado que este voltaje es bajo, se utiliza un seguidor de voltaje para separar el cilindro piezoeléctrico del microcontrolador sin varia la amplitud de la señal.

El sistema desarrollado para esta etapa es el de la figura A.1.4 y por tanto el ámbito máximo de trabajo será el del microcontrolador, 5V, que está bien dado que como máximo en el programa de barrido se utiliza 2V.

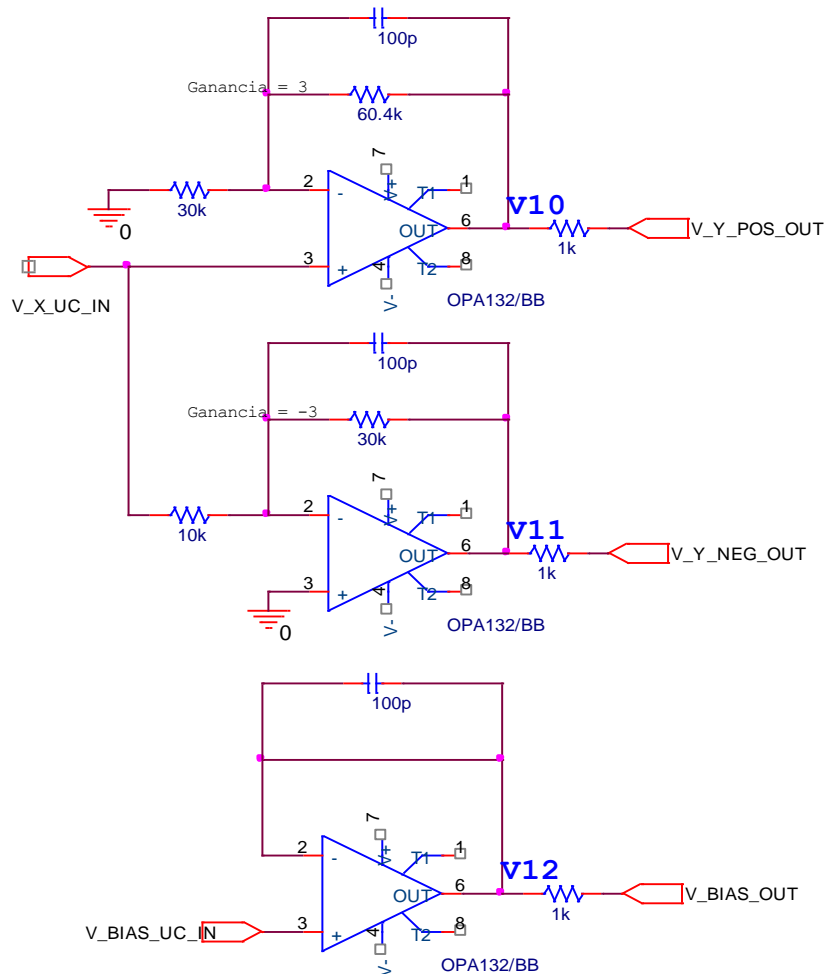
Es importante notar que la muestra se encontrará a un voltaje positivo con respecto a la entrada del amplificador de transimpedancia que se encuentra aterrizada y por tanto la corriente fluirá desde la muestra a la entrada del amplificador especificando correctamente que los electrones presentarán tunelaje desde la punta de barrido a la superficie de la muestra y no al revés.

### **3.1.9 Diseño implementado**

Como se dijo anteriormente, el diseño implementado constituye una simplificación del sistema completo diseñado, esto a manera de probar el sistema y lograr así verificar el funcionamiento del microscopio de efecto túnel.

En específico el sistema a implementar consiste en un sistema con amplificación de corriente normal, modo de barrido por corriente constante, sistema de control PI y amplificadores de 15V únicamente. De esta manera el sistema de los eje X y Y se tienen únicamente amplificadores del modo simple de preamplificación con amplificadores de 15V por lo que se tendrá un ámbito en X y Y de 1090nm y 252nm en Z.

En la zona superior de la figura 3.8 se muestra el sistema de amplificación para los ejes X y Y. En la inferior se tiene el circuito desarrollado para el voltaje de bias del sistema. Dado que en X y Y se tiene una simetría general, se entiende que para cada eje se tendrá un sistema equivalente al de esta figura.



**Figura 3.8: Amplificación del Eje X/Y y Voltaje de bias a implementar**

Para el eje Z se utiliza el circuito de la figura 3.9 que como se dijo antes es una simplificación del circuito de la figura 3.6 de gran utilidad como sistema de prueba de errores y depuración general de la electrónica.





### 3.1.10 Aislamiento electromagnético

Para realizar el aislamiento electromagnético se desarrolla un “Jaula de Faraday” que consiste en desarrollar una caja que envuelva al sistema de microscopía, para esto es importante tomar en cuenta varios puntos de importancia antes de diseñar la jaula. El primero es la imposibilidad de mover el sistema de microscopía de un lugar a otro si cuando se esté desarrollando el barrido, por tanto la jaula de Faraday debe de poder posicionarse y generar la mínima vibración en el sistema, por esta razón la jaula a desarrollar se diseñó de manera que se posicione sobre el sistema. Por otro lado el material de la Jaula de Faraday debe, por definición, ser metálico por lo que se utilizará aluminio debido a su maleabilidad

La jaula de Faraday consistirá por tanto de dos partes, una lámina metálica inferior sobre la cual se coloca la cabeza del microscopio y una sección superior que sella la jaula, junto a esto, debe tener una salida para los cables que energizan la cabeza del microscopía. La sección inferior será más amplia que la superior para lograr así que las ondas no puedan ingresar a la jaula desde las uniones entre las partes

Es importante notar que la jaula se implementará para disminuir el ruido en el sistema por lo que se utilizará en todo momento pero no se espera que la jaula sea perfecta dado que en general se confía que el ruido en el sistema sea bajo. Por esta razón resulta posible desarrollar la jaula en dos secciones y es posible tener una salida para los cables de alimentación, esto no sería posible si se desease una jaula de Faraday del mejor nivel que tendría que ser desarrollada con una pieza metálica ininterrumpida para evitar filtraciones de ondas electromagnéticas.

## **3.2 Programación**

A diferencia del campo electrónico en este campo no es necesario separar el diseño en uno completo y otro a implementar, sino que se trabaja con un sistema completo desde el inicio, suponiendo que el sistema electrónico en algún momento pueda mejorarse y de esta manera se pueda seguir utilizando el software desarrollado anteriormente sin tener que hacer cambios para incluir los nuevos aditamentos.

En esta sección se detallaran los diagramas de estados y el trabajo del software en cada uno de los estados de funcionamiento, se detallarán las funciones de primer nivel (estados máquina de Mealy) y de segundo nivel (funciones utilizadas de estados de la máquina de Mealy). Las funciones de nivel inferior (tercer y cuarto nivel) no serán descritas por medio de diagramas de estados sino se dará una breve discusión dado que su importancia no es grande y realizan funciones muy técnicas que no es necesario discutir en mayor detalle.

### **3.2.1 Variables importantes**

En el presente proyecto fue necesario idear una serie de variables de configuración y de almacenamiento de datos que capaces de lograr el buen funcionamiento del sistema sin desbordar la memoria del microcontrolador, un error común al trabajar con microcontroladores, en este caso se presentaba la posibilidad de desborde dado que con cada pixel de la imagen se ocupan 6 bytes de información que equivale a 384 kB para un barrido de 256 por 256 pixeles, comparado con 32kB de la memoria flash del microcontrolador.

Se comenzará explicando las estructuras de datos utilizadas y luego los arreglos y variables de importancia.

### **Estructura CONFIG**

```
typedef struct
{
    char    VBIAS,        //VOLTAJE DE BIAS PUNTA MUESTRA
           I_REF,        //CORRIENTE DE TUNEL DE REFERENCIA
           T_ESC,        //TAMAÑO ESCANEEO, 128x128, 256x256, ETC.
           T_PAS,        //TAMAÑO DE PASO ESCANEEO, 1, 2, 4, 8, ETC.
           EJE_R,        //EJE RAPIDO ESCANEEO, EJE X O EJE Y
           V_ESC,        //VELOCIDAD DE ESCANEEO, 1x, 2x, ETC.
           MODOF;        //MODO FUNCIONAMIENTO, ALTURA O CORRIENTE
} CONFIG;
```

Esta estructura se basa en 7 bytes de información que determinan el estado actual del sistema de microscopía, dependiendo del valor de los campos de VBIAS, I\_REF, etc. Los parámetros de esta estructura son de gran importancia y se detallan a continuación.

### **VBIAS**

Define el voltaje de Bias a aplicar a la muestra a barrer, de manera que genere la corriente de efecto túnel deseada. Tomando en cuenta la ecuación 2.2-10, para voltajes de bias bajos.

$$I_t = TI_i = \frac{e^2}{\pi\hbar} V e^{-2\kappa(z-z_e)} \quad (2.2-10)$$

Se nota por tanto que la corriente para voltajes de bias bajos, será proporcional a la tensión de bias utilizada. Debido a la alimentación de 5V del microcontrolador y la limitación de bajo Bias se utilizarán 16 niveles de Bias que varían desde los 0V a los 2.0V, La forma de implementar esta tensión se explicará más adelante en la sección del modo de configuración del microscopio.

### I\_REF

Este valor corresponde a la corriente de túnel de referencia que se utilizará como punto de operación para el sistema de control y por tanto simboliza el punto de equilibrio y la separación base entre la punta y la muestra.

De manera similar al VBIAS se tendrán 16 niveles I\_REF que variarán en este caso desde los 0V a los 4.7V en incrementos homogéneos entre nivel y nivel, se utiliza un nivel más amplio de tensión dado que este valor de I\_REF modifica la cercanía de la muestra y dependiendo de cada sistema a barrer puede ser de utilidad un valor mayor o menor y por tanto es mejor mantener un ámbito variado para mejorar el ámbito de materiales a utilizar.

### T\_ESC

En el sistema desarrollado se tendrán barridos de diferente tamaño, partiendo del tamaño base de 128x128 a de potencias de dos de este, en específico el T\_ESC equivale al exponente de la potencia de 2 propia del barrido y puede variar desde 0 a 7 por lo que se tendrán barridos desde 128x128 hasta 16384x16384 pixeles. Esto es posible dado que el sistema transmite las variables correspondientes las mediciones cada 128 pixeles para evitar sobrecargos de memoria en el sistema.

### T\_PAS

Esta variable corresponde al cambio que se realiza entre pixel y pixel al realizar el barrido en el barrido. El funcionamiento de este es similar al de T\_ESC en donde se tendrán pasos desde 1 a 128. Lo que esto significa es que en el DAC del eje correspondiente se harán conteos en el orden 0, 1, 2, 3... si T\_PAS equivale a 1 o bien 0, 64, 128, 192... si al contar con T\_PAS =128 y de manera análoga para los valores intermedios.

El poder hacer esto resulta de utilidad dado que da la posibilidad de hacer un muestreo de la superficie, con menor resolución, a mayor velocidad y logrando utilizar todo el ámbito del microscopio, algo muy importante si se desea conocer la superficie primero para verificar que se tenga una muestra significativa, luego si se desea, se puede minimizar T\_PAS y aumentar T\_ESC para obtener el mismo tamaño de barrido pero con una resolución mucho mayor, en un barrido de menor velocidad.

### EJE R

Se escoge el eje que se desea utilizar como eje rápido del barrido, esto dado que al realizar el barrido hay un eje que realiza movimiento entre pixel y pixel y otro que solo realiza movimientos en el momento que se cambia de fila. Para evitar desgastes diferentes en cada eje se implementa una configuración que varía el eje a utilizar.

Por otro lado el hecho de tener esta intercambiabilidad da la posibilidad de hacer un barrido de verificación para confirmar la presencia de ruido térmico en la superficie, de manera que se puede hacer un barrido y luego verificar la imagen obtenida variando el eje rápido para asegurarse que la imagen sea equivalente y no haya problemas de ruido en el sistema.

### V\_ESC

Este parámetro varía la velocidad de medición de cada pixel, de manera que es posible hacer barridos más rápidos dependiendo del valor de V\_ESC. Se tendrán 8 niveles de velocidad que varían desde 244 muestras/s en la velocidad mínima a 1950 muestras/s en la velocidad máxima.

La variación de velocidad se hace cambiando el valor de DECIMACION del convertidor ADC por lo que la conversión se hará más lenta conforme se aumente el multiplicador del V\_ESC; este cambio simboliza que las conversiones más lentas cuentan con mejor margen de ruido que las rápidas debido al problema que representa hacer conversiones de mayor velocidad.

### *MODOF*

Varía el modo de funcionamiento entre modo de Altura constante en el cual se muestrea el valor de corriente de túnel en cada pixel y el modo de Corriente constante en el cual en vez de muestrear la corriente de túnel se verifica el voltaje de salida del sistema de control, que equivale a la posición en el eje Z de la punta y por tanto la altura puntual de la superficie barrida.

### *Estructura PIXEL*

```
typedef struct
{
    unsigned int  pos_X,      //POSICION EN EJE X
                  pos_Y;     //POSICION EN EJE Y
    int           medicion;   //MEDICION, VOLTAJE Z O I TUNEL
} PIXEL;
```

Esta estructura es utilizada durante el barrido y equivale a los 6 bytes de información que se almacenan por cada uno de los pixeles en el sistema. Como puede verse se almacenan 2 bytes referentes a la posición en X y Y de la punta y otro referente a la variable medida para cada método de barrido, en el modo de corriente constante se muestreará el voltaje de la salida del sistema de control y en el modo de altura constante se muestreará la corriente de efecto túnel en el momento.

### **Estructura CENSADO**

```
typedef struct
{
    int    i_tunel,      //MEDICION CORRIENTE TUNEL INSTANTANEA
          v_piezo;      //MEDICION VPIEZO EJE Z INSTANTANEA
} CENSADO;
```

Esta es utilizada durante el proceso de acercamiento, esto dado que se utiliza para enviar el voltaje de salida del sistema de control y la corriente túnel en tiempo real por el puerto RS232. La funcionalidad de este radica en poder tener una medida de la corriente de túnel y el voltaje del piezoeléctrico para determinar si se encuentra completamente estirado tratando de acercarse a la muestra o bien encogido tratando de evitar una colisión con la superficie del material.

Esta estructura se volvió necesaria dado que la estructura PIXEL solamente puede guardar una medida por pixel y en el acercamiento es necesario conocer el voltaje del piezo en Z y la corriente de túnel en cada momento del acercamiento.

### **Arreglo Fila**

Corresponde a un arreglo de 128 celdas del tipo PIXEL, 768 bytes en total, estos equivalen a los valores que se mantienen en memoria de acceso aleatorio del sistema, en todo momento.

Se utilizan 128 pixeles dado que es el mayor valor que fue posible introducir en la memoria del microcontrolador. La idea detrás de este almacenamiento en memoria RAM es de poder muestrear 128 pixeles y luego transmitir la información de estos por medio del protocolo RS232 a la computadora que mostrará el diagrama tridimensional de la superficie



muestreada. Los datos se envían cada 128 pixeles para no tener que estar enviando muy a menudo dado que el comenzar transmisiones seriales representa un tiempo de espera considerable y por tanto si se envían bastantes datos a la vez, los tiempos de establecimiento se verán repartidos entre los datos de manera que se mejore la eficiencia de la transmisión.

### **Variables ACTUAL y ANTERIOR**

Corresponden a dos variables del tipo CONFIG, que son de gran utilidad dado que ayudan para comparar el estado ACTUAL de la máquina de estados del microscopio y la última de configuración conocida, ANTERIOR, si se presenta un cambio será necesario determinarlo y enviar a modificar este valor para obtener el comportamiento deseado.

### **Variable VALORES**

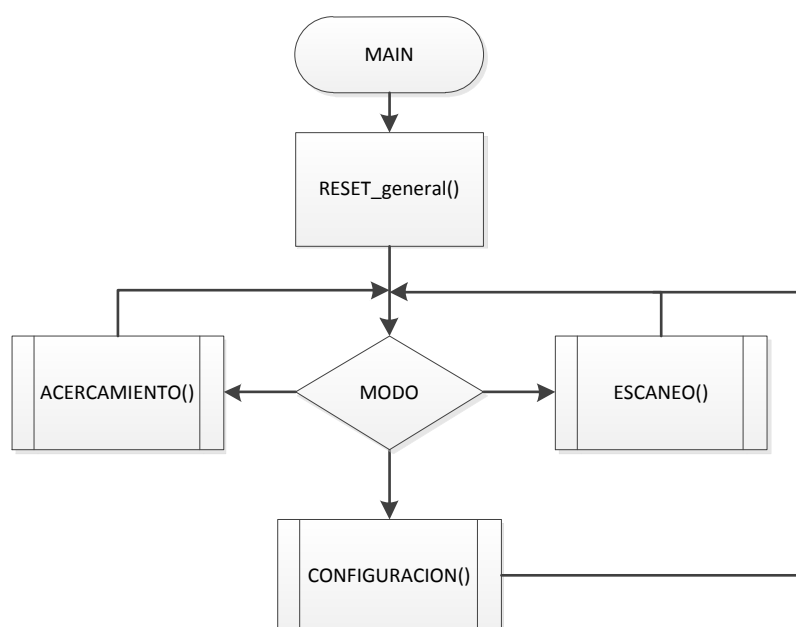
Es utilizada únicamente en el modo de acercamiento y corresponde a una variable del tipo CENSADO que incluye una medida de la tensión del eje Z del piezoeléctrico y una medida de la corriente de efecto túnel en la posición dada.

En este modo, los datos se envían continuamente, por lo cual no resulta necesario que se almacene más de una variable del tipo CENSADO, como sí lo era con el arreglo de datos del modo de barrido.

Las variables anteriores corresponden a las variables de mayor utilidad en el código desarrollado, si fuese necesario conocer de otra variable utilizada se puede observar el código fuente del microscopio dado que en este se explican brevemente cada una de las variables utilizadas.

### 3.2.2 Funcionamiento general

El sistema de microscopía cuenta con tres estados fundamentales de gran utilidad. Estos se muestran en la figura 3.10, en esta puede notarse que los tres estados (ACERCAMIENTO, ESCANEEO y CONFIGURACIÓN) se repiten indefinidamente durante la activación del microcontrolador. Los tres estados corresponden a funciones de primer nivel que cuentan con funciones de menor importancia en su interior.

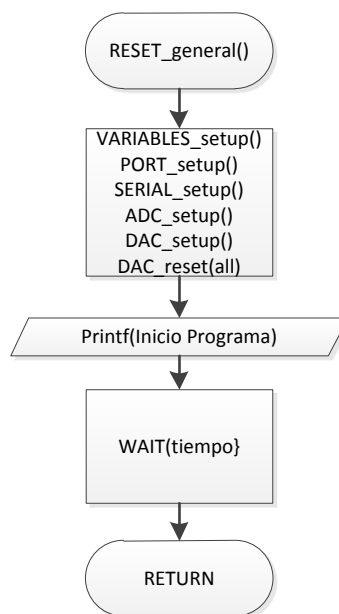


**Figura 3.10: Diagrama de estados del sistema de microscopía**

Estos modos de funcionamiento se detallarán a continuación tomando la programación real como medio de explicación para el software, de manera que se utilizarán las funciones y variables reales para describir el funcionamiento del sistema, para así simplificar la exposición del programa y que si se tuviese alguna duda del software se facilite la interacción con el mismo y poder referirse al código con una facilidad mayor.

### **Función RESET\_general()**

Esta es una función de primer nivel al ser llamada dentro del diagrama de estados principal del sistema (figura 3.11).



**Figura 3.11: Diagrama función RESET\_general()**

Si bien no es un estado per se, la función `RESET_general()` realiza la configuración de todos los registros necesarios para el funcionamiento del sistema, como puede verse en la figura 3.11, se inicializan las variables a utilizar, por ejemplo se vacía los valores del arreglo `FILA` y se ponen los registros de configuración en sus valores iniciales. Junto a esto se ponen los valores necesarios para el funcionamiento del puerto serial y los puertos `ADC` y `DAC` del sistema. Al finalizar se envía por el puerto serial un mensaje de Inicio de Programa y se espera unos milisegundos antes de entrar al loop infinito del sistema.

Es importante notar que esta función se realiza una única vez y luego de inicializada se pasa a la sección de selección y manejo de modo de la cual el sistema no puede salir, a diferencia de las otras funciones de primer nivel, esta es de complejidad bastante menor.

### **Función ESCANEO()**

Este corresponde al modo fundamental del sistema de microscopía dado que en este se realiza el barrido superficial de la muestra y se envían los datos al computador para que este luego haga un análisis más cuantitativo de los datos.

El diagrama general de esta macrofunción se encuentra en la figura 3.12 y es posible notar que para lograr que se realicen las labores necesarias de este modo, es necesario utilizar cierta cantidad de funciones que serán desarrolladas más adelante.

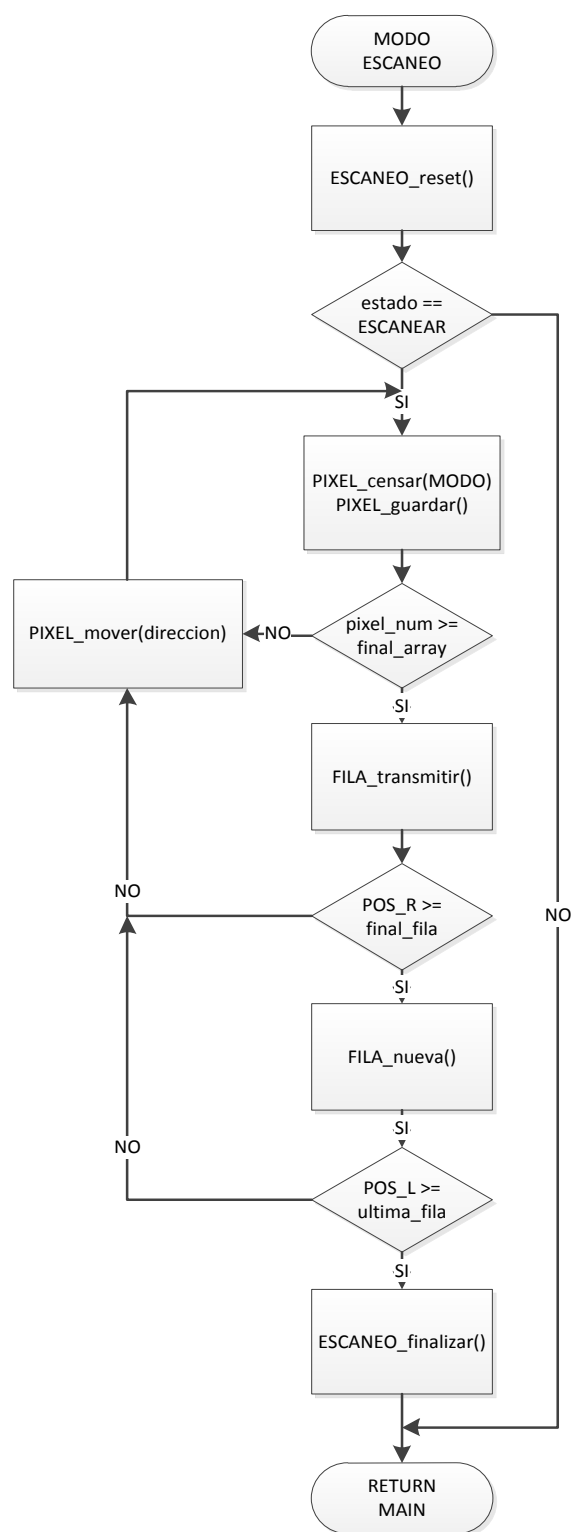
En general el modo de barrido, lo que realiza inicialmente es reiniciar todas las variables de interés para el sistema (ESCANEO\_reset()) y luego entrar al ciclo de barrido. En este se pregunta si ya se ha terminado de hacer el rastreo, si esto no ha sucedido, se procede a censar el valor de corriente de tunelaje o voltaje en el eje Z del piezoeléctrico, que se realiza por medio de las funciones PIXEL\_censar(modos) y PIXEL\_guardar(). Posteriormente se pregunta si se han hecho 128 medidas (FILA\_MIN), esto dado que el sistema cuenta con un máximo de 128 pixel para guardar en memoria y luego de esto es necesario transmitir (FILA\_transmitir()), que es lo que se realiza si de hecho se ha llegado a las 128 mediciones.

Luego de transmitir, se pregunta si estos últimos 128 pixeles correspondían a los últimos de una fila, dado que debido al tamaño variable de los barridos se pueden tener filas desde 128 a 16384 pixeles de largo, si se presentaba el final de la línea, se procede a mover

la punta del piezoeléctrico en una posición en el eje lento de la medición (FILA\_nueva()). Por último si la fila actual era la última fila del barrido, se procederá a finalizar el barrido (ESCANEEO\_finalizar()) y se saldrá del programa.

Ahora, si en las posiciones en donde se preguntó si se estaba en el pixel 128, final de línea, o bien final de barrido, se obtiene una respuesta negativa, se procederá a mover la posición de la punta en el eje rápido del barrido (PIXEL\_mover(dirección)), es importante notar que en este caso, algunas líneas se barren de izquierda a derecha y otras de derecha a izquierda (ver figura 1.2), por esto la función de movimiento cuenta con la entrada de dirección del movimiento.

En general, esto es lo que se realiza en el estado de barrido, es importante notar que en general el diagrama de esta función se pasa muchas veces antes de salir, dado que cada imagen del microscopio de efecto túnel se compone de una imagen cuadrada de  $N \times N$  pixeles y cada uno representa un ciclo dentro de la función de barrido, por lo que el diagrama de estado de esta función es de gran importancia para el microscopio y por tanto los tiempos que se utilicen en este serán los que decida los retardos más importantes en el barrido superficial. Más adelante se hablará de cómo se hace para temporizar el sistema, que en general se trata de variar los tiempos de espera en este estado, en conjunto con el tiempo de conversión analógico-digital.



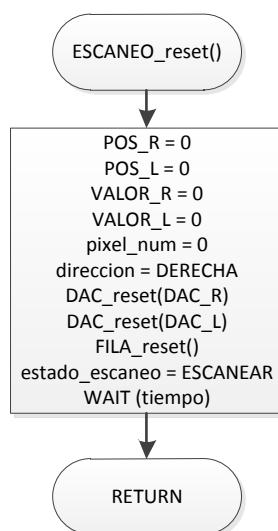
**Figura 3.12: Diagrama función ESCANEO()**

Se continuará explicando de mejor manera las funciones de segundo nivel, que son las llamadas por la función ESCANEO(), esto dado que no son necesariamente triviales y son de gran importancia para el funcionamiento del sistema.

#### Función ESCANEO\_reset()

En esta función se reinician todos los valores de barrido para asegurar que el sistema se encontrará listo para hacer el barrido y que comenzará de la manera debida.

En específico, se resetean los valores de posición de eje Rápido y Lento del barrido (POS\_x y VALOR\_x), junto a esto se inicializa el puntero para el arreglo FILA(pixel\_num) para comenzar la fila en el primer elemento del arreglo, luego se pone un valor de 0 en los DACs de barrido para comenzar el barrido y borran todas las posiciones del arreglo FILA, para evitar que se tengan valores anteriores al guardar. Por último se pone el estado de barrido en barrer, para que se comience el proceso, se espera un tiempo y se entra al ciclo de barrido.

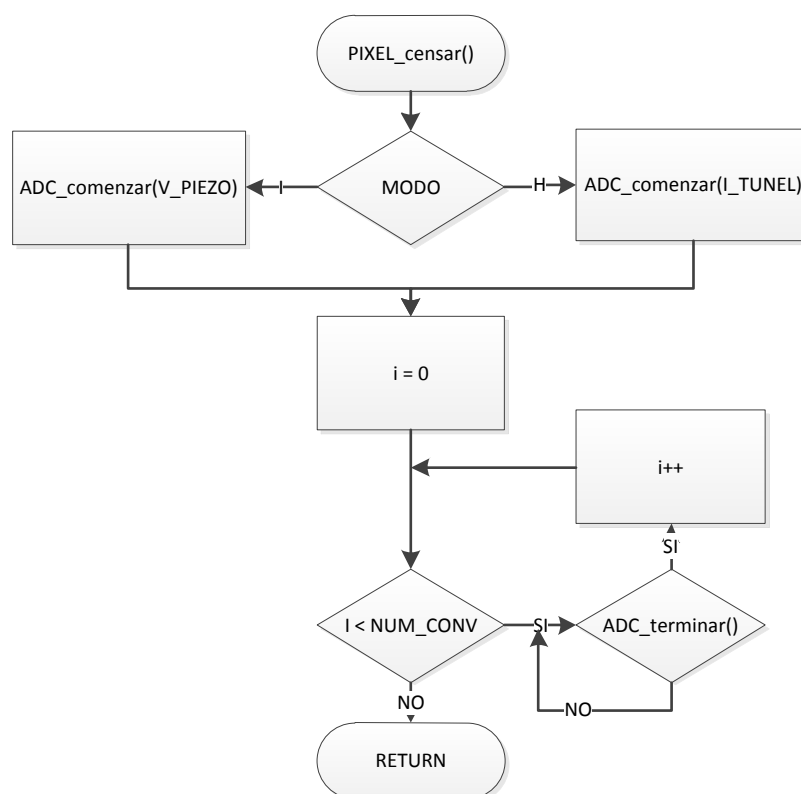


**Figura 3.13: Diagrama función ESCANEO\_reset()**

Función *PIXEL\_censar()*

Esta función lo que realiza es un muestreo de la superficie barrida. Al comenzar la función se pregunta por el modo de barrido a utilizar, entre el modo de barrido a altura constante (H) en el cual se debe muestrear la corriente de tunelaje y el modo de barrido de corriente constante (I) donde debe censarse el voltaje del eje Z del piezoeléctrico proveniente del sistema del control.

Posterior a esto el sistema espera un número dado de conversiones analógico-digital (NUM\_CONV), esto dado que la primera conversión usualmente cuenta con una relación señal-ruido mucho menor que en las mediciones siguientes y el margen de ruido mejora luego de varias conversiones. Al terminar las conversiones solicitadas se sale de la función.

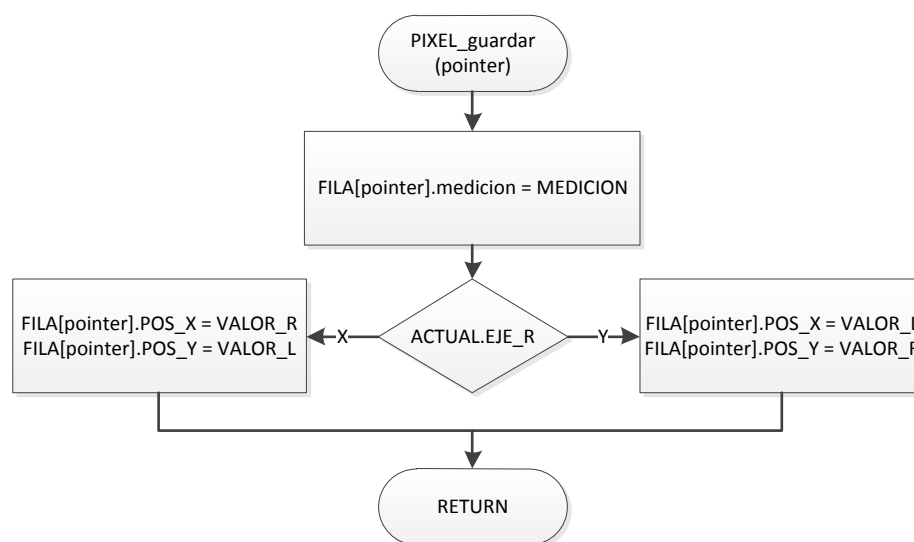


**Figura 3.14: Diagrama función *PIXEL\_censar()***



Función *PIXEL\_guardar(pointer)*

Luego de realizar las conversiones analógico-digital, en la función `PIXEL_censar()` se procede a guardar el resultado de la última conversión realizada. Para esto se procede a preguntar por el eje rápido actual, dado que dependiendo del eje, se pondrá el valor rápido en el eje X o en el Y o al revés, lo mismo se realiza con el eje lento, esto se realiza para mantener el eje X y Y estables en las conversiones y que sea posible comparar imágenes de una superficie al barrerla utilizando un eje rápido u otro. Si no se hiciese esto se presentaría que entre una imagen y otra habría que transponer una de ellas para poder comparar las imágenes, en este caso dado que se realiza la consideración al guardar no es necesario efectuar esta operación, para poder así poder comparar las imágenes de manera directa.



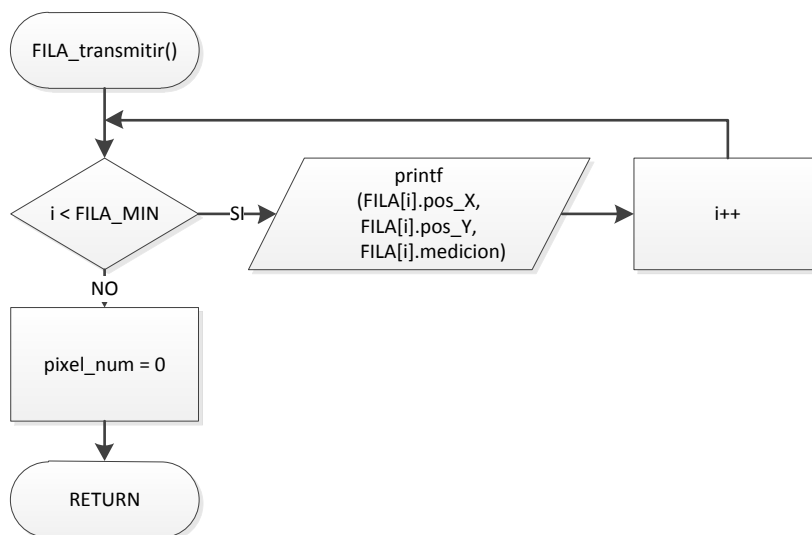
**Figura 3.15: Diagrama función `PIXEL_guardar(pointer)`**

### Función *FILA transmitir()*

Dado que el sistema cuenta únicamente con la capacidad de almacenar 128 pixeles en memoria, al llenarse esta es necesario transmitir los datos para poder refrescar la memoria y continuar con los siguientes 128 pixeles del barrido.

Para realizar la transmisión de datos se procede a enviar un pixel por vez, enviando ciertos caracteres de control para poder luego verificar de mejor manera los datos recibidos en el computador. Luego de transmitido el primer pixel, se entra a un bucle que se repite hasta enviar todos los datos necesarios.

Por último y antes de salir se reinicia el valor del puntero del arreglo para comenzar a guardar datos desde el primer pixel de memoria.

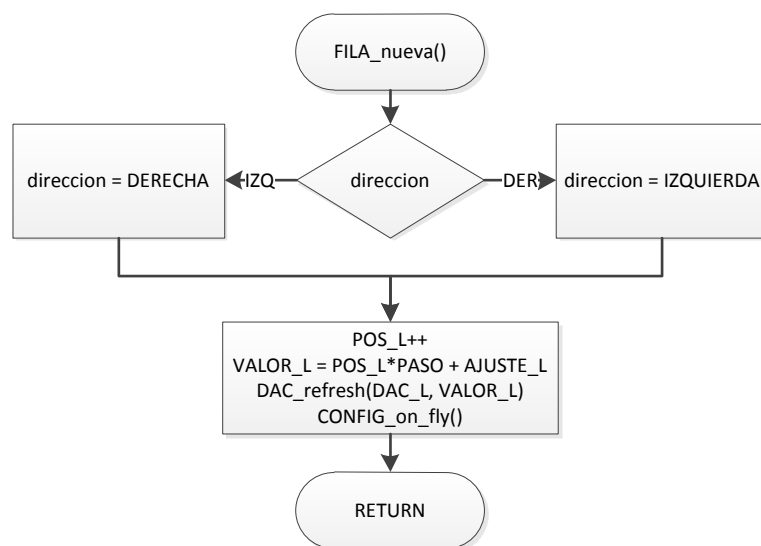


**Figura 3.16: Diagrama función `FILA_transmitir()`**

### Función *FILA\_nueva()*

Si se llega a determinar que los últimos 128 pixeles barridos correspondían a los últimos de una fila de la imagen barrida, se procede a cambiar de línea, moviendo, en una posición el valor del eje lento del barrido.

Junto a esto, la función *FILA\_nueva()* se encarga de dirigir el movimiento de la punta de barrido, de izquierda a derecha en las filas pares y de derecha a izquierda en las impares, de manera que sea posible seguir el movimiento descrito en la figura 1.2 y así se minimice el impacto al piezoeléctrico, al no generan los cambios bruscos de movimiento entre línea y línea, que se darían si al iniciar cada nueva fila se comenzara a la izquierda tal y como se hace al leer. Al implementar este método, no se genera cambios grandes y es posible darle mayor vida útil al cilindro piezoeléctrico.



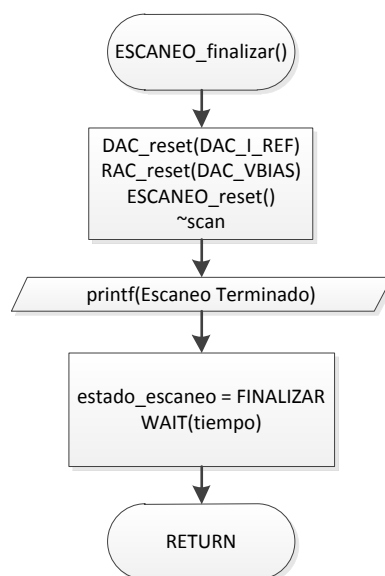
**Figura 3.17: Diagrama función *FILA\_nueva()***

Función ESCANEEO\_finalizar()

Si fuese el caso que los últimos 128 píxeles representaran los últimos del barrido se procede a finalizar este y volver al modo de configuración a la espera de una nueva solicitud de barrido.

Para terminar el barrido se devuelve la punta de barrido a la posición de origen (0,0) y se reinician las variables de barrido como manera de seguridad. Luego se hace toggle a la variable scan que sirve para que el modo de configuración sepa que se ha salido de un barrido y no se entre de nuevo hasta que se haya efectuado un toggle en el bit más significativo del modo funcionamiento general del sistema de microscopía.

Posterior a esto se imprime al computador la señal de Escaneo finalizado, para que pueda comenzar a analizar los datos adquiridos y realizar la gráfica tridimensional de la superficie muestreada. Para terminar se cambia el estado de barrido a finalizar para que se salga de bucle de barrido y se espera un tiempo corto.

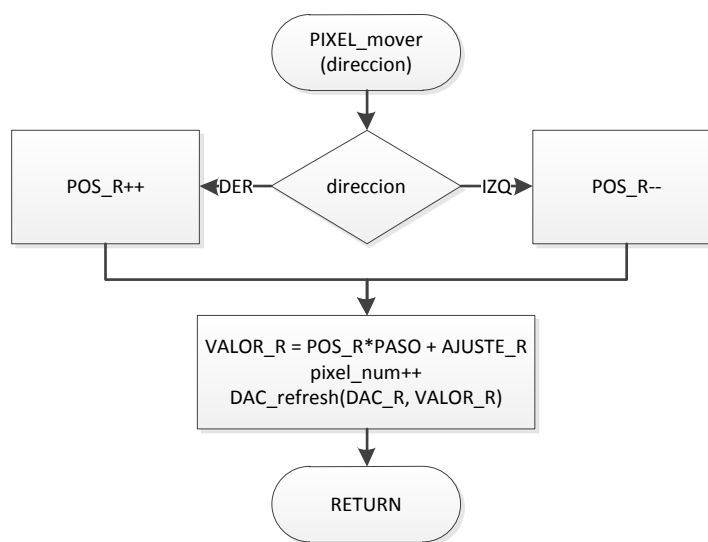


**Figura 3.18: Diagrama función ESCANEEO\_finalizar()**

Función *PIXEL\_mover(direccion)*

La última función del modo de barrido realiza el movimiento en el eje rápido de barrido, esta se realiza en el caso en que las condiciones de pregunta del diagrama de estados del modo de barrido no se cumplan, a saber, el sistema no tenga la memoria llena (128 pixeles barridos desde última transmisión), o bien si se tuviese llena la memoria pero no se estuviese en el final de la línea o final del barrido.

En específico en esta función lo que se realiza es mover el eje rápido del barrido en una posición, dependiendo de la dirección en la que deba hacerse el barrido, luego de hecho el cambio se determina el valor real que debe ponerse en el registro del convertidor DAC y refrescar este para realizar el cambio. Por último se aumenta en una posición el puntero del arreglo FILA, para que se guarde el dato en la posición correcta luego de hacer la conversión ADC en `PIXEL_censar()`.



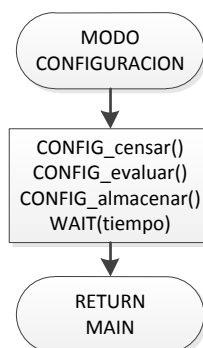
**Figura 3.19: Diagrama función `PIXEL_mover(direccion)`**

### **Función CONFIGURACION()**

Esta función representa al segundo modo de funcionamiento del sistema de microscopía, este modo es bastante más simple que el pasado aún y cuando lo que se realiza es de importancia, el diagrama general de este modo se muestra en la figura 3.20.

Actualmente el sistema censa los valores de configuración de los pines externos del microcontrolador, por tanto lo que se hace es muestrear los tres puertos utilizados de manera que se obtengan los nuevos valores de configuración, esto se realiza por medio de la función CONFIG\_censar().

Posterior a esto, se evalúa si los valores censados corresponden a los valores de configuración anteriores (CONFIG\_evaluar()) y si hay alguna diferencia se procede a actualizar los valores en el interior del microcontrolador, en específico se modifican los valores propios de la estructura CONFIG, en otras palabras, el tamaño de barrido, tamaño del paso de barrido, velocidad de barrido, eje rápido de barrido, modo de barrido, voltaje de bias y corriente de túnel de referencia. Por último, luego de evaluar y poner al día al sistema, se procede a almacenar los valores de configuración del ciclo actual para poder compararlos en los ciclos futuros (CONFIG\_almacenar()).



**Figura 3.20: Diagrama función CONFIGURACION()**

Se continuará explicando de mejor manera las funciones de segundo nivel, que son llamadas por la función CONFIGURACION().

Función CONFIG\_censar()

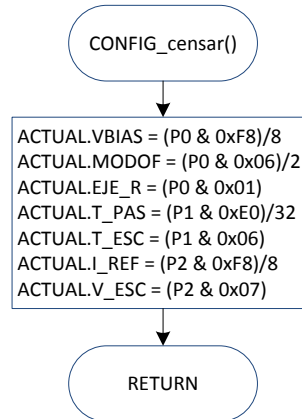
Esta función constituye la primera función de este modo y lo que realiza es tomar los valores procedentes del mundo exterior digitalizando los valores a la entrada de los primeros 3 puertos del microcontrolador. Para tomar los datos estos se leen directamente de los 24 pines asignados a los tres puertos y se asignan según la tabla 3.1

**Tabla 3.1: Asignación valores de configuración**

<i>Valor</i>	<i>Puerto</i>	<i>Bits asignados</i>	<i>Niveles cuantización</i>
VBIAS	0	7 - 4	16
MODOF	0	3 - 1	8
EJE_R	0	0	2
T_PAS	1	7 - 5	8
T_ESC	1	2 - 0	8
I_REF	2	7 - 4	16
V_ESC	2	3 - 0	16

Podemos notar de esto que las configuración más detalladas son las de VBIAS. I\_REF y V\_ESC dado que corresponden las variables más importantes del barrido las demás variables son cuantizada de menor manera pero su importancia no se ve disminuida.

Al muestrear los datos se procede a almacenarlos en la estructura ACTUAL que sigue el esquema CONFIG y por tanto consiste en 7 bytes de configuración, más adelante esta estructura se comparará con la anterior para determinar cambios en los deseos del usuario.



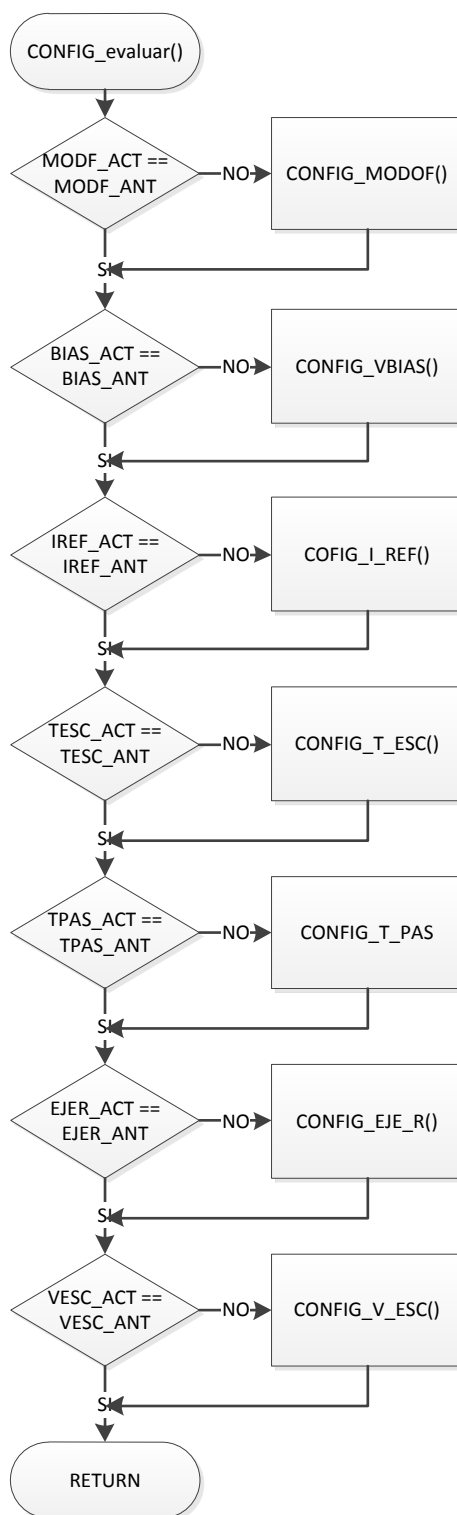
**Figura 3.21: Diagrama función CONFIG\_censar()**

Función CONFIG\_evaluar()

Teniendo los nuevos valores almacenados en la variable ACTUAL, se procede a comparar con los valores de la variable ANTERIOR que contiene los valores del ciclo anterior de configuración.

Dado que se pueden generar más de un cambio de configuración por ciclo el sistema necesita preguntar por cambios en cualquiera de los 7 valores de interés. Si se detecta un cambio se procede a llamar la función que actualiza el valor y hace los cambios propios para realizar el comportamiento deseado por el usuario.

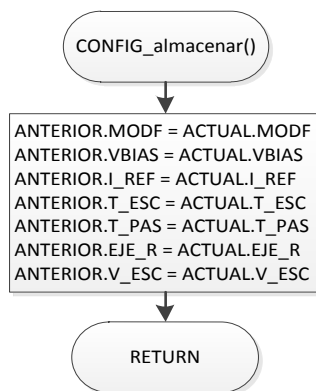




**Figura 3.22: Diagrama función CONFIG\_evaluar()**

### Función CONFIG\_almacenar()

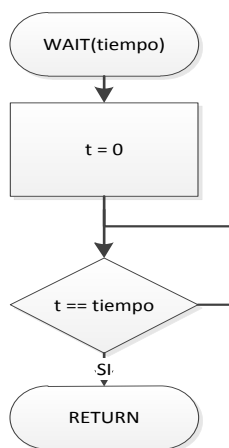
Posterior al evaluó se procede a almacenar los valores de la variable ACTUAL con la variable ANTERIOR, esto para poder utilizarlo como variable de comparación a futuro en el próximo ciclo del modo de configuración.



**Figura 3.23: Diagrama función CONFIG\_almacenar()**

### Función WAIT(tiempo)

Esta función genera un retardo de cierta cantidad de milisegundos asignada por el usuario mediante el argumento tiempo. Se puede esperar máximo 128ms, para valores mayores es necesario llamar de manera repetitiva a esta función hasta obtener lo deseado.

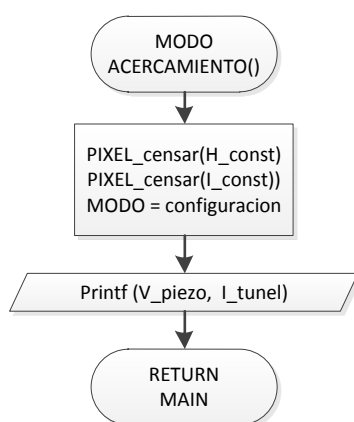


**Figura 3.24: Diagrama función WAIT(tiempo)**

### **Función ACERCAMIENTO()**

Este es el tercer modo de funcionamiento del sistema, en este se envían por vía serial al computador los datos de corriente de tunelaje y voltaje del piezoeléctrico del eje Z. Esto se realiza en tiempo real de manera que se puedan hacer ajustes mientras se hace el acercamiento punta muestra, se tiene un diagrama general de este modo en la figura 3.25

Técnicamente este no es un modo de funcionamiento per se, dado que al salir del modo se solicita que se vuelva al modo de configuración para actualizar los valores de funcionamiento. Esto se puede hacer dado que al configurar, el sistema mismo se dará cuenta que se solicita que se entre al modo de acercamiento, mediante los valores en los pines de configuración del sistema y por tanto, del modo de configuración se pasará nuevamente al de acercamiento de manera cíclica. Por tanto este modo es bastante más simple y equivale primordialmente a una funcionalidad extra para el modo de configuración.



**Figura 3.25: Diagrama función ACERCAMIENTO()**

### 3.2.3 Temporización

El proceso de temporización en el sistema se da de manera bastante diferente entre los modos de funcionamiento. Para el modo de configuración la temporización de refrescamiento de los datos se da cada 25ms mediante la función WAIT. Por su parte el modo de acercamiento posee el mismo esquema de temporización dado que este estado se basa en el de configuración y por tanto se enviarán los datos de voltaje en el piezoeléctrico y corriente de tunelaje cada 25ms a la computadora.

En el modo de barrido, la temporización es más complicada y se explicará en mayor detalle. En específico, debe tomarse en cuenta que en este modo se espera poder variar la velocidad de barrido, de manera casi lineal y por tanto es necesario utilizar un variable que modifique la temporización de este modo, en este caso esta variable es SPEED que toma valores de 1 a 8.

En este modo, los procesos que toman tiempo son, la conversión Analógica a Digital y la transmisión de datos vía serial. A la transmisión serial no puede modificársele la velocidad y está siempre se dará a 9600 baudios por segundo. La transmisión de cada pixel se da con un formato determinado siguiendo el esquema.

**X0000Y0000Z0000**

Este esquema significa que se transmite la letra X seguido del valor de posición en el eje X del pixel censado, luego Y y la posición en Y, por último Z y el valor medido en Z. Puede notarse que por cada pixel se envía un total de 15 caracteres ASCII en el printf, por tanto y debido a que se transmiten 128 pixeles por ocasión, se necesitan 200ms para hacer la transmisión, lo que equivale a 1.56ms por cada pixel y este tiempo no puede variarse.

En cuanto al proceso de conversión analógico-digital, la frecuencia de conversiones viene dado por la ecuación 2.2-1

$$Freq_{conversión} = \frac{F_{clock}}{64 \cdot (FREQ+1) \cdot decimation \cdot SPEED} \quad (2.2-1)$$

Se utiliza un reloj de 11.0592MHz y un valor de FREQ = 0 y decimation = 42, por lo que se puede simplificar 2.2-1. Se tiene por tanto

$$Freq_{conversión} = \frac{4114.8}{SPEED} \quad (3.2-1)$$

Puede verse por tanto que como máximo se realizarán 4114 conversiones por segundo y como mínimo 514.

Ahora, es importante recordar que en la función PIXEL\_censar() se deben realizar NUM\_CONV conversiones ADC por cada pixel y por tanto se tendrá que la frecuencia de pixeles está dada por:

$$Freq_{conversión} = \frac{4114.8}{SPEED \cdot NUM\_CONV} \quad (3.2-2)$$

Esto puede convertirse a tiempo de conversión

$$T_{ADC \text{ pixel}} = 2.43 \cdot SPEED \cdot NUM\_CONV \text{ ms} \quad (3.2-3)$$

Por último si se une el tiempo de transmisión de datos se tiene que el tiempo real por pixel se determina por la ecuación 2.2-5

$$T_{pixel} = 2.43 \cdot SPEED \cdot NUM\_CONV + 1.56 \text{ ms} \quad (3.2-4)$$

Por tanto, tomando NUM\_CONV = 2, se podrán transmitir como máximo 155.8 pixeles por segundo y como mínimo 24.7 y por tanto un barrido de 128x128 pixeles toma 1.75 minutos a la velocidad máxima y 11.05 minutos en la velocidad menor.

Cabe notar, que dado que conforme se aumenta la velocidad, el valor de SPEED disminuye, la precisión del convertidor ADC se ve empeorada por lo que siempre debe tomarse en cuenta que si se desea una conversión de alta calidad es necesario invertir más tiempo para asegurarse de que la conversión de datos se haga con una mayor precisión.

A futuro, se espera mejorar la velocidad del barrido mediante la utilización de convertidores ADC externos con una frecuencia de operación mayor que logran disminuir al mínimo el tiempo de conversión y a su vez transmitir con velocidades de transmisión mayores para lograr velocidades de barrido de 1000 o 2000 pixeles por segundo como velocidad máxima.

### **3.3 Diseño Mecánico**

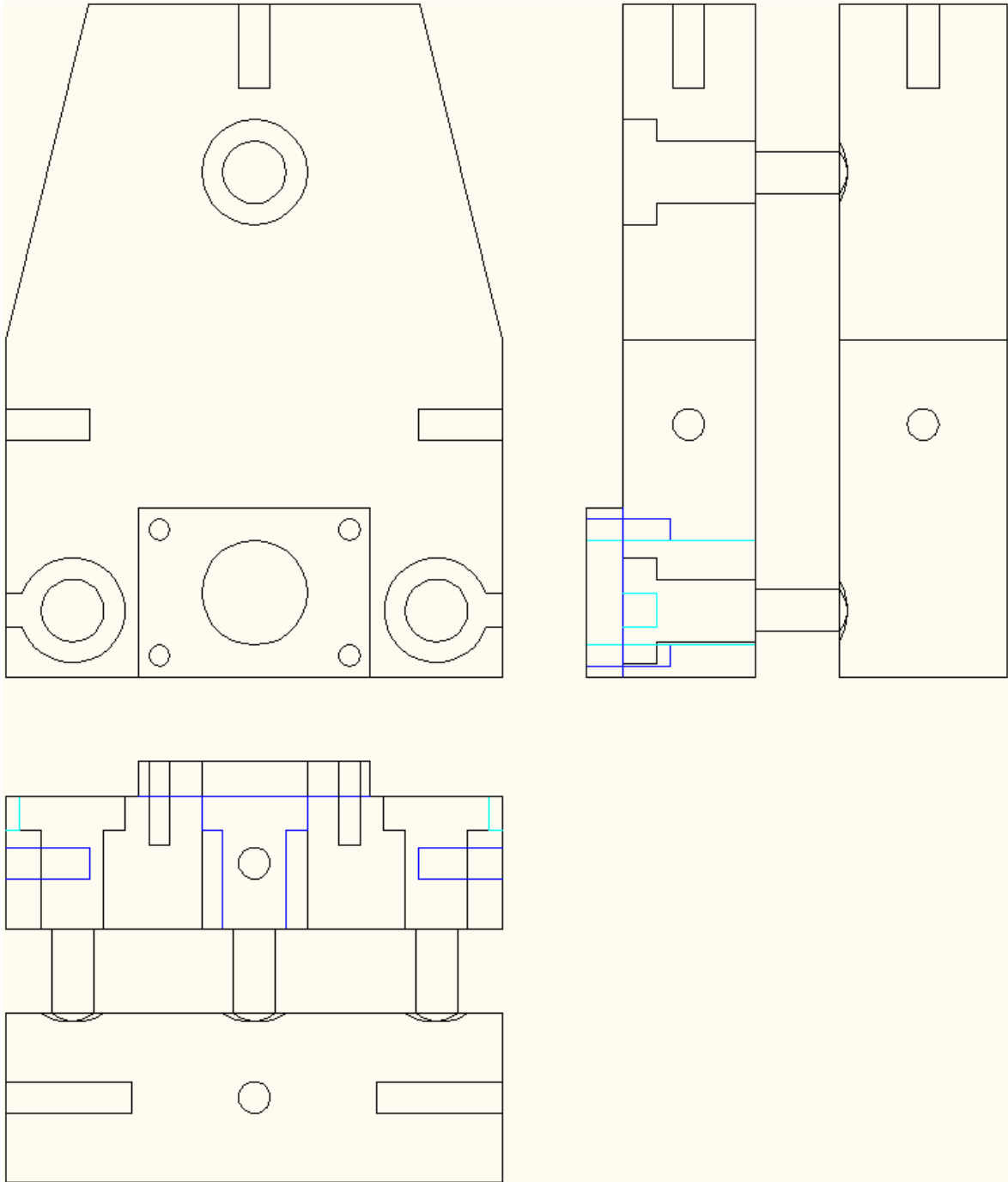
El diseño mecánico fue basado en el artículo “Scanning tunneling microscopy of processes at liquid-solid interfaces” por Paul Hansma et. al. En este se presenta un microscopio de efecto túnel basado en tres apoyos. El desarrollado en este proyecto es similar, con la diferencia de que en este proyecto se buscaba hacer análisis en un medio líquido, algo que se puede considerar para un futuro.

Junto a esta referencia se utilizó un proyecto de la Universidad de Muenster en Alemania dirigido por el doctor Harald Fuchs que diseñó un microscopio de efecto túnel y publicó los planos y esquemáticos como medio de difusión científica.

#### **3.3.1 Cabeza del microscopio**

El diseño desarrollado consiste en un sistema de tres apoyos que da estabilidad mecánica con un mínimo de piezas. Los apoyos consisten en tornillos de rosca muy fina (127 vueltas por pulgada, o bien  $200\mu\text{m}$  por vuelta). La finalidad de estos tornillos es servir como medios de acercamiento para la punta de manera que con movimientos pequeños sea posible controlar el acercamiento, el sistema sigue el diagrama de la figura 3.26.

El sistema se encuentra desarrollado en aluminio debido a razones presupuestarias primordialmente dado que lo ideal es utilizar un material denso, acero inoxidable idóneamente, para lograr frecuencias de resonancia altas en el sistema, se espera que no haya mayor inconveniente al implementarlo en aluminio. Por otro lado dado que el aluminio es más fácil de trabajar, al desarrollar el sistema de aluminio se depuró el diseño y más adelante puede pasarse a acero para mejorar la frecuencia de resonancia del sistema.



**Figura 3.26; Diagrama mecánico del microscopio**



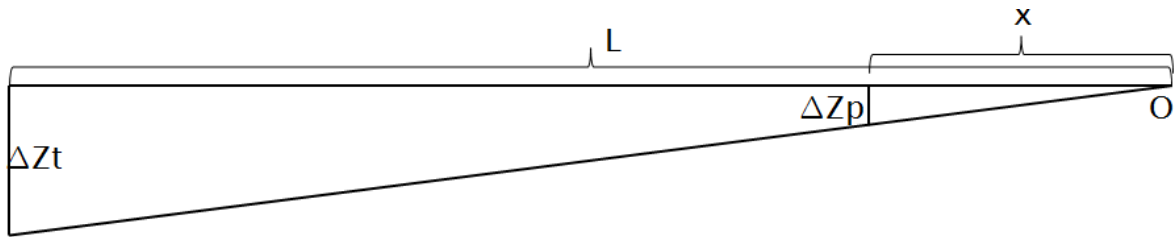
La característica más importancia del sistema es la manera en la cual se posicionan los apoyos dado que al tener dos frontales y uno trasero, se podrán realizar ajustes de diferente precisión, dependiendo del tornillo utilizado, esto debido a la geometría del sistema.

Los dos tornillos frontales se encuentran cercanos a la punta de barrido (0.27cm) mientras que el otro tornillo se encuentra más alejado (6.62cm), esta diferencia de distancias significa que un movimiento en los tornillos delanteros será bastante mayor que una en el tornillo trasero. Para comprender esto debe observarse la figura 3.27, en donde se tiene un triángulo de altura  $\Delta Z_t$  a una distancia  $L$  del vértice  $O$ , mientras que cuenta con una altura  $\Delta Z_p$  a una distancia  $x$  de este vértice y estas alturas se encuentran relacionadas mediante la ecuación 3.3-1.

$$\Delta Z_p = \frac{x}{L} \Delta Z_T \quad (3.3-1)$$

Para el caso del microscopio de efecto túnel este fenómeno representa que una variación  $\Delta Z_t$ , en el tornillo de ajuste fino (lejano a la punta) corresponderá a una variación de  $L/x$  veces menor en la punta misma.

En este caso, se tiene  $L=6.62\text{cm}$ ,  $x=0.27\text{cm}$  por lo que  $L/x = 24.5$ , por tanto si consideramos una vuelta del tornillo de ajuste fino que equivale a  $200\mu\text{m}$  se generará una variación de  $8.2\mu\text{m}$  en la punta, algo de gran importancia para el sistema de barrido, dado que se considera que el sistema de control genera una deflexión de hasta  $200\text{nm}$  en la punta de manera que será posible acercar la punta de manera manual a la muestra hasta llevarla a una distancia que garantice la capacidad de realizar tunelaje.



**Figura 3.27: Geometría sistema de acercamiento fino**

### 3.3.2 Piezoeléctrico

Refiriéndose al desarrollo de la sección 2.3 Materiales Piezoeléctricos y en específico a la figura 2.5, la tabla 2.2 y las ecuaciones siguientes tomadas de esa sección, es posible obtener los valores de la tabla 3.2.

$$\Delta X = \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot \Delta V_X}{\pi \cdot ID \cdot d} \quad (2.3-1)$$

$$\Delta Y = \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot \Delta V_Y}{\pi \cdot ID \cdot d} \quad (2.3-2)$$

$$\Delta Z = \frac{d_{31} L \cdot \Delta V_Z}{d} \quad (2.3-3)$$

$$C_{cil} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot \pi \cdot L \cdot OD}{2 \cdot d} \quad (2.3-8)$$

$$f_{para} = \frac{\sqrt{\frac{Y}{r_{ho}}}}{4 \cdot L} \quad (2.3-9)$$

$$f_{perp} = \frac{0.56 \cdot \sqrt{\frac{Y}{r_{ho}}} \cdot \sqrt{OD^2 + (OD-d)^2}}{8 \cdot L^2} \quad (2.3-10)$$

**Tabla 3.2: Características piezoeléctricas del cilindro piezoeléctrico**

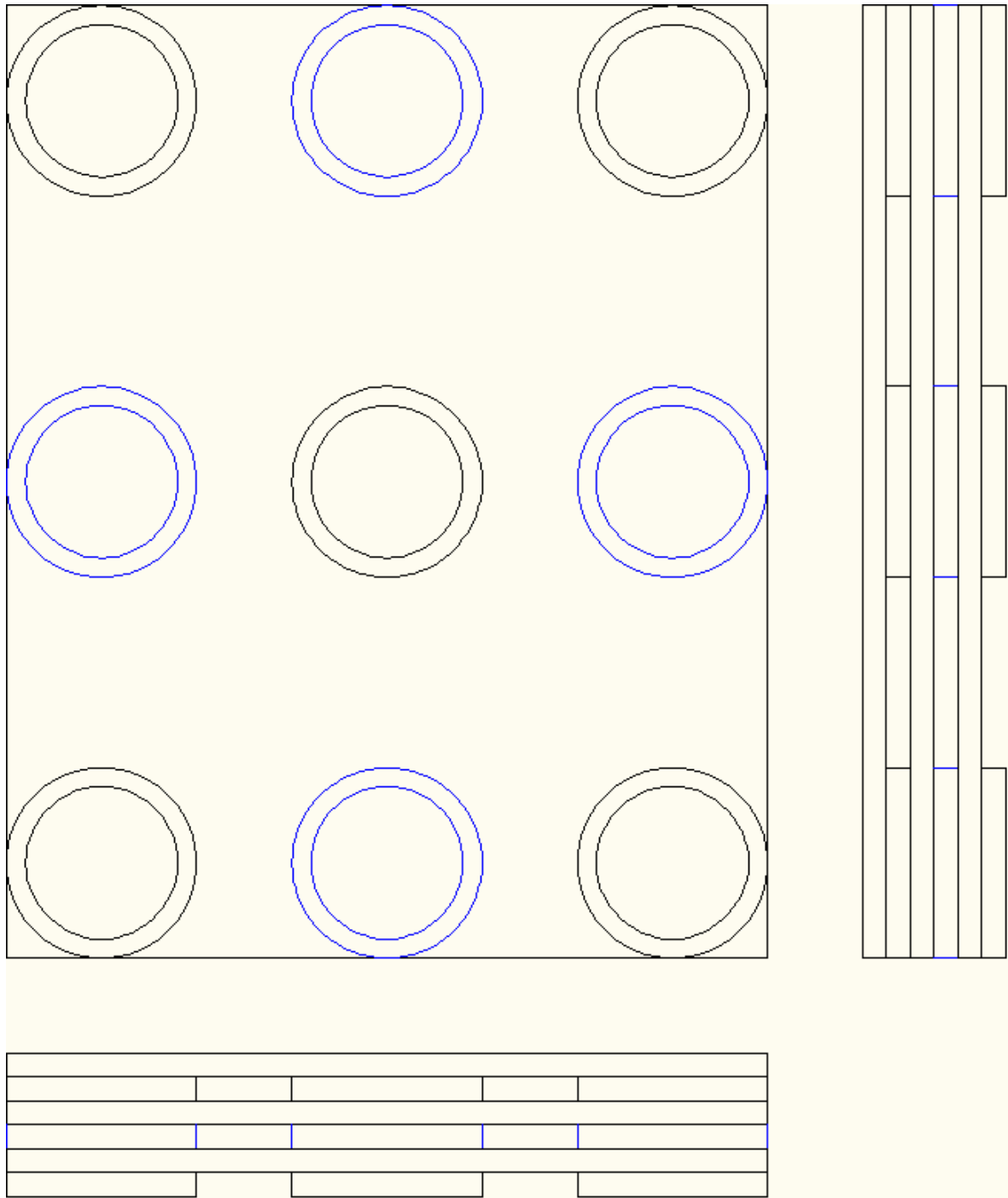
	OD	ID	d	L	$d_{31}$	Y	$r_{ho}$	$\Delta X$	$\Delta Z$	$C_{cil}$	$f_{para}$	$f_{perp}$
<b>BM527</b>	6.6	5.3	0.65	25.4	215	6.9	7.5	362.5	84.0	9.9	2.95	28.92
Unidades	mm	mm	mm	mm	nm/V	$10^{10} \text{ N/m}^2$	$\text{g/cm}^3$	Å/V	Å/V	nF	kHz	kHz

Estos valores se dan utilizando el cilindro BMT527 0260 0210 1000 de la marca Sensortech, que debido a presupuesto y características representa el mejor sistema a utilizar, logrando ámbitos de barrido en X y Y de hasta 1090nm y en Z de 252nm utilizando un voltaje de funcionamiento de  $\pm 15V$ , dando una buena capacidad de barrido a bajos voltajes de excitación, lo que ahorra la necesidad de barrer con altos voltajes, algo que es necesario con materiales con constante  $d_{31}$  menor, como el PZT4 y hasta el cuarzo cristalino.

### **3.3.3 Aislamiento mecánico**

Para el presente proyecto fue necesario desarrollar un sistema de aislamiento mecánico, para ello se desarrolla un sistema simple que se basa en poner placas mecánicas separadas por anillos de hule o bien un material suave.

Una imagen del sistema se tiene en la figura 3.28, es importante notar que sobre esta se debe posicionar el sistema de la figura 3.26. Este sistema consiste en tres placas de aluminio de 4"x5" intercaladas con anillos de hule, o bien láminas de espuma suave de 1" de diámetro, se espera con esto minimizar las vibraciones, si este no se pudiera realizar de buena manera o bien se necesitase mayor inmunización del ruido se puede utilizar el sistema de aislamiento mecánico utilizado para el microscopio de fuerza atómica del CICIMA, aunque se espera que para medidas iniciales esto no sea necesario.



**Figura 3.28: Sistema de aislamiento mecánico**

### **3.3.4 Posibilidades a futuro**

El diseño mecánico actual da pie a la mejora y a implementar características de gran interés, entre ellas se encuentra la posibilidad de crear una celda de líquidos para poder así medir superficies inmersas en líquidos para dar estabilidad a las superficies. También resulta posible y de gran utilidad desarrollar un sistema de manipulación en X y Y de la muestra para poder mover esta de manera precisa dentro de lo posible con los tornillos de alta precisión. Esto es de gran utilidad dado que actualmente el sistema no cuenta con un sistema robusto para el movimiento de la muestra y depende del movimiento manual de la muestra para lograr muestrear zonas diferentes del material.

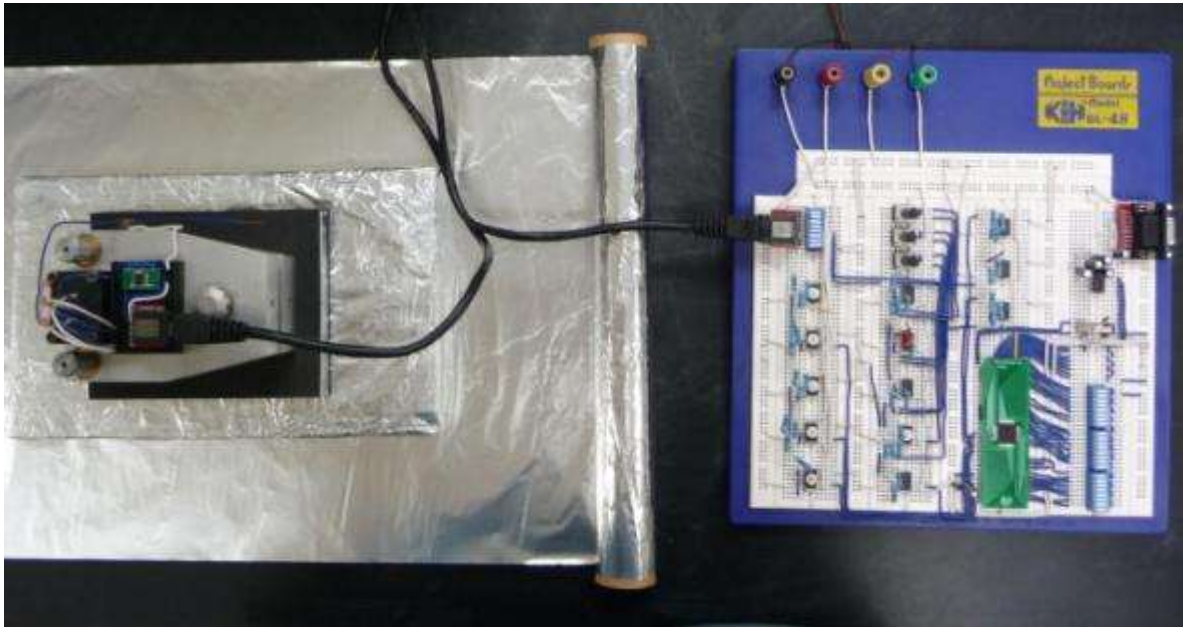
Tendiendo estos cambios en mente el último cambio que podría generarse es cambiar de material a acero inoxidable para aumentar la frecuencia de resonancia del sistema y lograr mejorar la inmunidad al ruido del sistema. Si resultaría importante cambiar a acero inoxidable cuando se tenga la celda de líquido y el sistema de manipulación X y Y implementado dado que así se garantiza tener un diseño final e implementar en acero un sistema libre de errores como modelo final del microscopio.

De la misma manera se espera que a futuro sea posible implementar el sistema electrónico completo y lograr así que el sistema cuente con mayores utilidades tanto mecánicas como electrónicas y obtener así un sistema aún más robusto que el actual.

## CAPÍTULO 4: Implementación y verificación experimental

En esta sección se expondrán los sistemas implementados y las pruebas desarrolladas sobre estos sistemas, se separara el sistema de microscopía en varias áreas separadas para poder explicar de buena manera los logros, problemas y resultados obtenidos en cada sección del desarrollo

En la figura 4.1 se incluye una fotografía del sistema de microscopía completo, se tiene a la izquierda, la cabeza de microscopía con el sistema de amplificación de transimpedancia, el sistema de aislamiento vibraciones y la sección inferior de la Jaula de Faraday, a la derecha se tiene la electrónica principal del sistema, el sistema de control y los amplificadores de voltaje a utilizar, también se tiene el microcontrolador MSC1211Y5 y la interfaz serial utilizada para descargar el programa desarrollado en el microcontrolador y que éste transmita los datos al usuario.



**Figura 4.1: Sistema de microscopía completo**

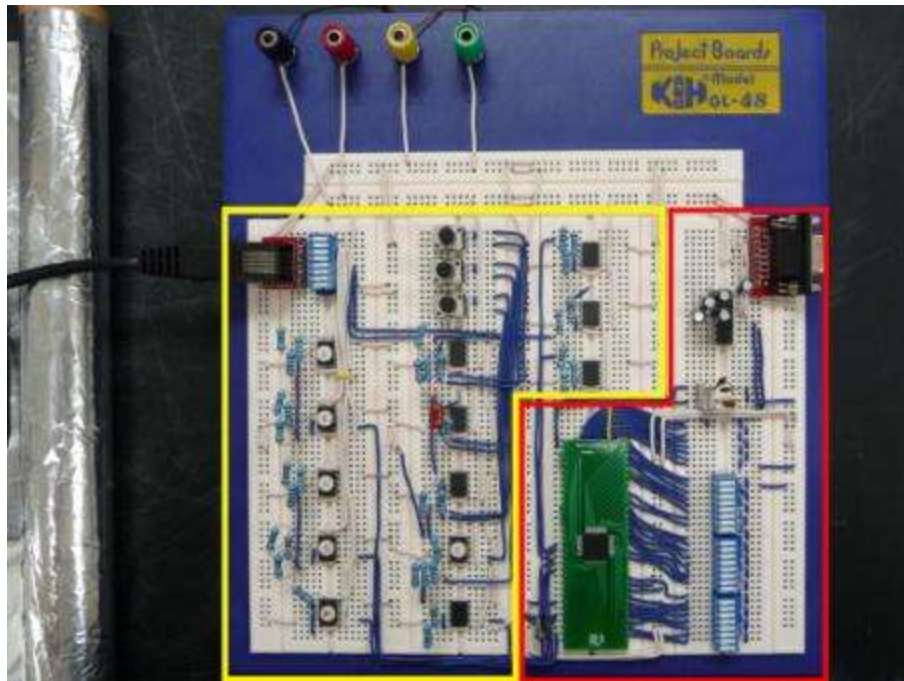
## 4.1 Electrónica

### 4.1.1 Sistemas elaborados

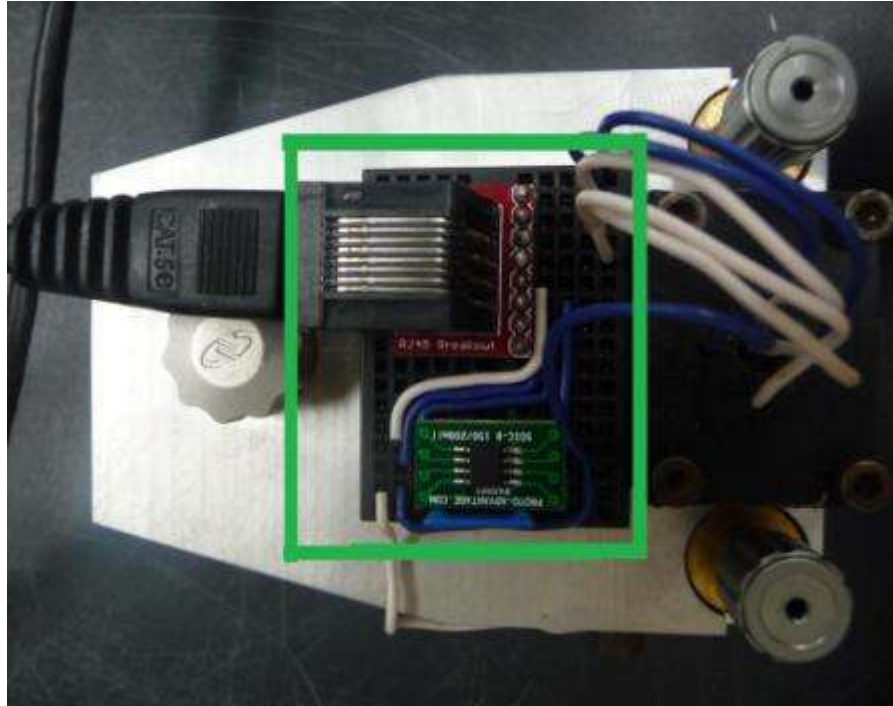
La primera sección a describir es la de electrónica, dado que en esta recae la mayor parte de las necesidades del sistema. Para esta sección será importante hacer notar que se utilizan resistencias de banda metálica con tolerancia de 1% para todas las cargas del sistema excepto en la resistencia del amplificador de transimpedancia que utiliza una resistencia de este tipo pero con una tolerancia del 0.5%.

Por otro lado los amplificadores operacionales utilizados son los OPA132 de Texas Instruments, que son amplificadores con bajos niveles de ruido y corriente de bias, haciéndolos óptimos para aplicaciones como las desarrolladas en este caso.

Los sistemas desarrollados en este rubro se presentan en las figuras 4.2 y 4.3



**Figura 4.2: Sistema de control (Amarillo) y Microcontrolador (Rojo)**

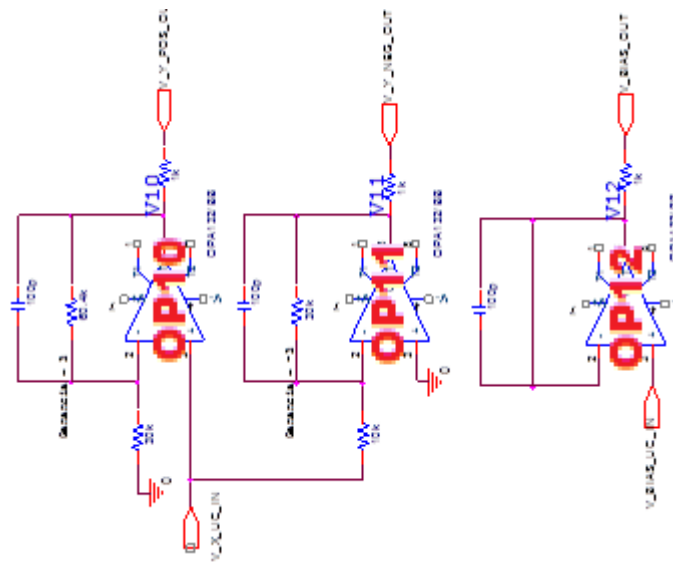


**Figura 4.3: Amplificador de Transimpedancia (Verde)**

Puede verse que la sección del sistema de control es bastante complicada, contando con 13 amplificadores operacionales trabajando en modos varios. Para verificar que este sistema se encontrase funcionando de la mejor manera posible, se procede a realizar pruebas a cada operacional del sistema, para verificar su margen de ruido y que este se encuentre desarrollando la función para el cual fue destinado. Para facilitar la descripción de estos operacionales, las pruebas desarrolladas y las operaciones teóricas que estos deben realizar, se incluyen las figuras 4.4 y 4.5, que son copias numeradas de las imágenes 3.8 y 3.9 que describen el sistema a implementar.







**Figura 4.5: Sistemas amplificación eje X y Y, Voltaje Bias, con numeración a utilizar**

#### 4.1.2 Pruebas realizadas

Como se dijo anteriormente, se realizaron pruebas para verificar el buen funcionamiento de cada sección de la electrónica, estas pruebas se expondrán y detallarán a continuación.

Es importante detallar que las pruebas se desarrollan con un voltaje de alimentación bipolar de 12V DC, por lo que el sistema, tendrá un ámbito de 24V para su funcionamiento. Se escogió este valor dado que los amplificadores están desarrollados para funcionar con un voltaje bipolar de 18V pero, para evitar disminuir la vida útil del sistema y debido a que le proceso de prueba de sistemas electrónicos es propenso a errores, se prefirió trabajar con un voltaje menor para poder así disminuir las corriente de falla. Por tanto, luego de realizar las pruebas de funcionamiento se podrá aumentar el voltaje y por tanto mejorar características como el tamaño de la superficie a barrer y desplazamiento máximo en Z del sistema.

### Pruebas al Sistema Control del Eje Z

#### Operacional OP1: Amplificador I\_REF

Este amplificador cuenta con una ganancia teórica de -3 y es utilizado para introducir el valor de referencia de la corriente de túnel al sistema. Tomando en cuenta que el microcontrolador cuenta con una salida de hasta 5V, al agregar una ganancia de -3 se puede lograr que el amplificador entregue valores de hasta 15V, dado que se utiliza un voltaje de alimentación se saturará en este valor en vez.

Para la prueba se utiliza un voltaje DC en el pin de entrada y se varía su voltaje de entrada desde -4V a 4V, se logra determinar, como es de esperar, que el amplificador se satura a un voltaje menor a los 12V, estos voltaje de saturación se presentan en la tabla 4.1

**Tabla 4.1: Saturación OP1: Amplificador I\_REF**

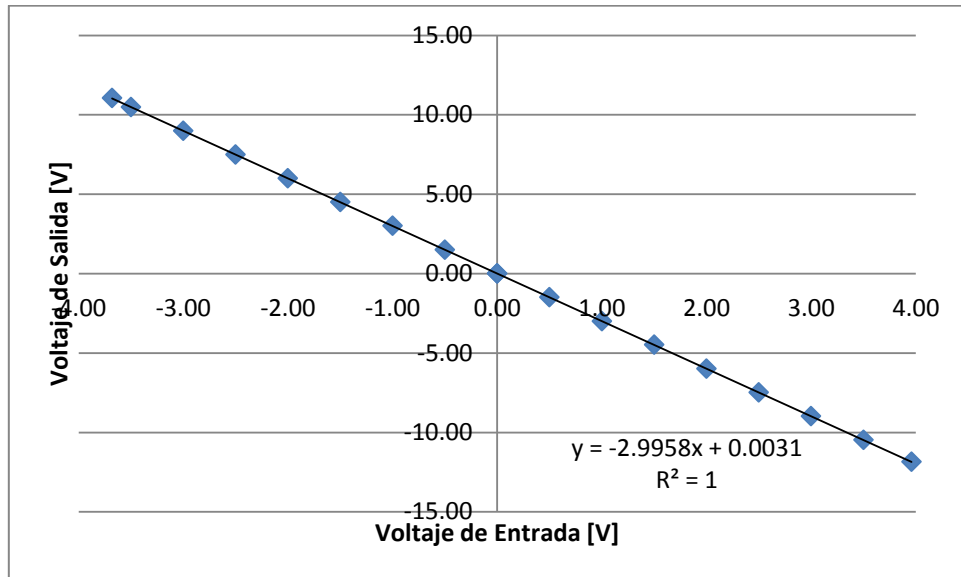
	$V_{in}$	$V_{out}$
Saturación Negativa	3.9600	-11.85
Saturación Positiva	-3.6800	11.05

Junto a esto se verifica el funcionamiento lineal del amplificador y se logra determinar la ecuación de amplificación del sistema:

$$V_{OUT} = -2.9958V_{IN} + 0.0031 \quad (4.1.-1)$$

Para efectos prácticos este sistema es equivalente a la función esperada por el mismo  $V_{OUT} = -3V_{IN}$  generando un valor medio de error del 0.13%.

En la figura 4.6 se incluye la prueba desarrollada en conjunto con la curva de mejor ajuste respectiva



**Figura 4.6: OP1: Prueba Amplificador I\_REF**

Operacional OP2: Amplificador Sustractor

El presente amplificador desarrolla la sustracción de los valores en las patillas del amplificador, por tanto el amplificador seguirá la relación:

$$V_{OUT} = V_{IN_1} - V_{IN_2} \quad (4.1-2)$$

La prueba desarrollada en este caso consiste en variar el voltaje de entrada en la patilla  $V_{IN_1}$  manteniendo  $V_{IN_2}$  constante en un valor de 5V. Con esta prueba se nota una saturación en los valores descritos en la tabla 4.2

**Tabla 4.2: Saturación OP2: Amplificador Sustractor**

	$V_{in}$	$V_{out}$
Saturación Negativa	16.09	11.06
Saturación Positiva	-6.79	11.83

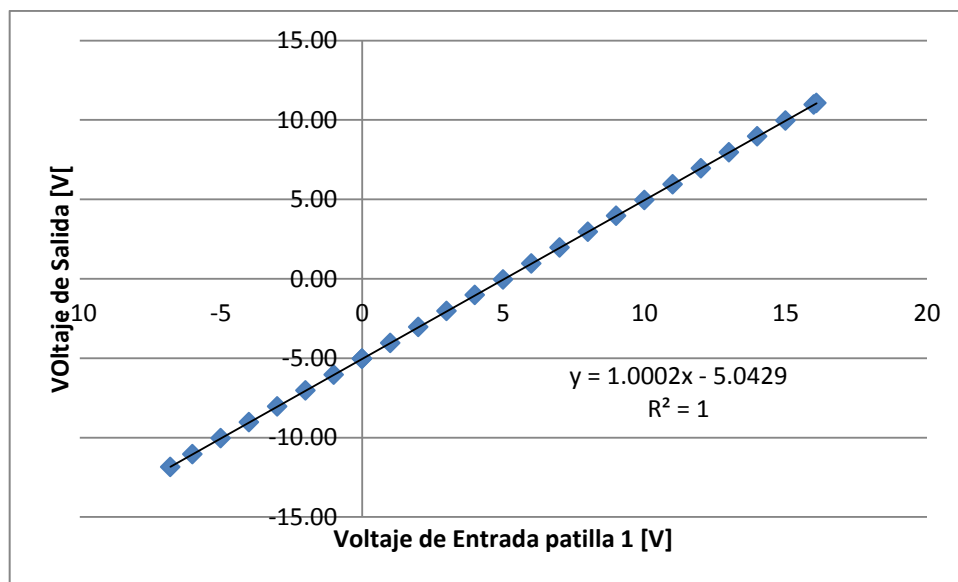
Por tanto el sistema logra realizar la sustracción para valores positivos de entrada de un mayor valor, que en caso de tratar valores negativos, esto es de esperar dado que el

sistema puede alcanzar únicamente los  $\pm 12V$ . De los datos obtenidos, se encuentra la curva de mejor ajuste:

$$V_{OUT} = 1.0002V_{IN_1} - 5.0429 \quad (4.1-3)$$

Esta prueba cuenta con un porcentaje de error del 1.1%, que es mayor al del OP1 pero que a su vez es suficientemente bajo como para verificar que el sistema opera de buena manera.

En la figura 4.7, se incluye un gráfico de los datos tomados con su respectiva curva de mejor ajuste.



**Figura 4.7: OP2: Prueba Amplificador Sustractor**

Cabe notar que en este caso se utilizó 5V como “corriente” de referencia, pero debido a la forma que se diseñó el programa del microcontrolador este valor puede variar desde 0V a 14.1V dependiendo de las exigencias del usuario.

Operacional OP3: Controlador Proporcional

Esta prueba verifica el comportamiento de la sección proporcional del sistema de control desarrollado, este sistema es un amplificador inversor de amplitud variable.

En este caso, para verificar el funcionamiento se hace un barrido de resistencia de ganancia, modificando la ganancia desde un valor de -1 a uno de -10.3. Se utiliza un voltaje de entrada de 1V que dependiendo de la ganancia puede generar -1V a -10.3V en la salida.

Como se mencionó anteriormente, este amplificador es del tipo inversor (ver Anexo A.1.1). En este caso se tiene  $R_2 = 9.88k\Omega$  y  $R_1$  varía desde  $9.88\Omega$  (ganancia -1) a  $101.6k\Omega$ . (Ganancia -10.3).

Para esta prueba es necesario probar el funcionamiento del amplificador en el ámbito de voltaje positivo y negativo, por lo cual se procede a utilizar dos voltajes de entrada ( $\pm 1V$ ) y realizar las pruebas en sucesión.

En la tabla 4.3 se agregan los voltajes de saturación para este caso.

**Tabla 4.3: Saturación OP3: Controlador Proporcional**

	Resistencia	Voltaje
Saturación Positiva	98.5K	11.000
Saturación Negativa	101.4K	-11.500

Al realizar la prueba para  $V_{IN} = 1V$ , se obtiene la ecuación de funcionamiento:

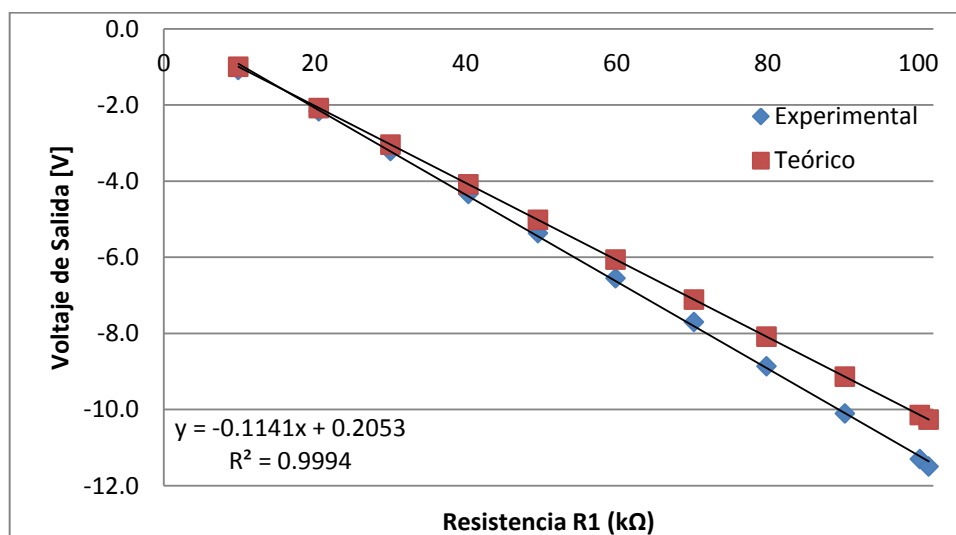
$$V_{OUT} = -0.1141V_{IN} + 0.2053 \quad (4.1-4)$$

Lo que genera un porcentaje de error del 8.3%. Para el caso  $V_{IN} = -1V$ .

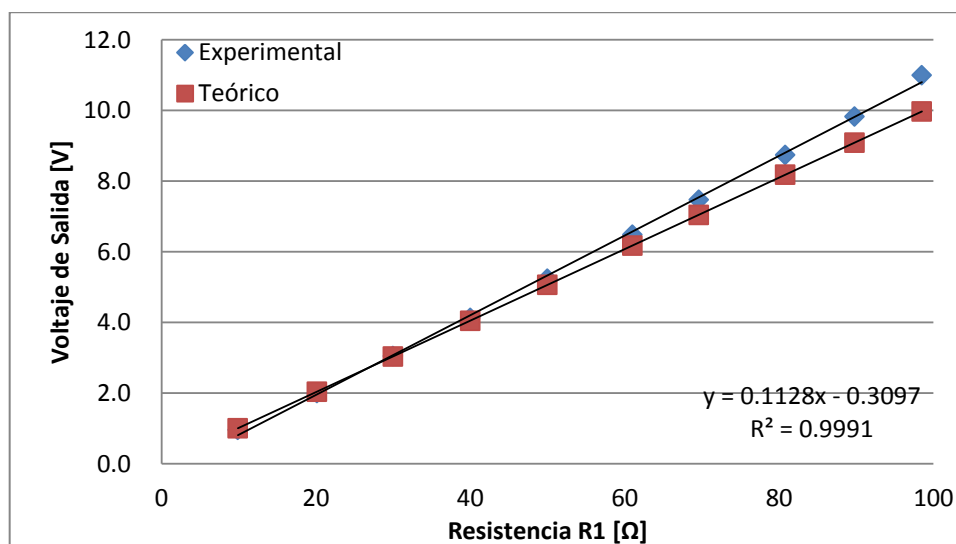
$$V_{OUT} = 0.1128V_{IN} - 0.3097 \quad (4.1-5)$$

Para este caso se obtiene un 4.9% de error.

Es importante notar que ambos valores son bastante más altos a los obtenidos anteriormente, pero debido a que la función descrita se apega de buena manera a una función lineal, se concluye que el funcionamiento del amplificador de control proporcional es lineal y se apega por tanto a lo deseado para este sistema. En las figuras 4.8 y 4.9 se incluye un resumen de la prueba desarrollada.



**Figura 4.8: OP3: Prueba Amplificador Control Proporcional,  $V_{IN} = 1V$**



**Figura 4.9: OP3: Prueba Amplificador Control Proporcional,  $V_{IN} = -1V$**

### Operacional OP4: Controlador Integrador

El análisis para el controlador integrador es bastante más detallado que los demás debido a que este funciona de una manera diferente, al realizar la integración de la señal y por tanto ser un sistema con memoria. Para este sistema se realizan varias pruebas en AC y en DC para determinar que el sistema realice la función de integración de buena manera y además verificar el funcionamiento en frecuencia del controlador.

En este sistema es importante notar que debido a pequeños valores de ruido o bien que la señal de entrada cuente con un nivel DC diferente a cero, el integrador se comenzará a saturar hacia alguno de sus límites de voltaje esto es de esperar dado que las fuentes de alimentación no son perfectas y siempre, no importa lo que se realice, se tendrá un ruido inherente al medio o al mismo sistema en medición.

Para determinar cuan influyente es este ruido en la saturación del sistema y también estimar el valor medio de este ruido se realiza la primera prueba que consiste en introducir un voltaje DC en la patilla de entrada del sistema y verificar el tiempo que dura el integrador en saturarse. Dado que el integrador siempre se encuentra saturado hacia alguno de sus voltajes de alimentación, la prueba de saturación comienza en un extremo, por ejemplo +12V y termina en el otro, -12V, por tanto el tiempo que dura el sistema en ir de un voltaje al otro es el tiempo de saturación.

Por otro lado, dado que el tiempo de integración del OP4 es variable (desde 1ms a 100ms), para notar la variación se realizan dos pruebas en los extremos del tiempo de integración para que se note como influye el tiempo de integración en el controlador.



El tiempo de integración está dado por la multiplicación de la resistencia del amplificador por la capacitancia, los utilizados en esta prueba se encuentran en la tabla 4.4, puede verse que para una aproximación puede tomarse 1ms y 100ms sin mayor problema.

**Tabla 4.4: Saturación OP4, Extremos del tiempo de saturación del integrador**

<i>Resistencia (<math>\Omega</math>)</i>	<i>Capacitancia (<math>\mu F</math>)</i>	<i>Tiempo Integración (ms)</i>
0.998	0.98	0.98
102.8	0.98	100.74

En la figura 4.10 se aprecia el procedimiento realizado en la prueba, se comienza con un voltaje saturado positivo, en el momento que se aplica el voltaje, el sistema comienza a disminuir el voltaje hasta saturarse negativamente, el tiempo entre que se aplica el voltaje de entrada y se satura el sistema es el tiempo de saturación especificado en la prueba, en el caso de la figura 4.10 el tiempo es de 472ms, es importante notar que este caso se realizó con el tiempo de integración más bajo, 1ms y un voltaje de entrada de 10mV que es el mínimo suministrado por la fuente de alimentación.

Utilizando un tiempo de integración de 100ms y manteniendo las demás variables constantes, se obtiene la imagen de la figura 4.11 donde se puede notar un tiempo de saturación de 216s, casi 500 veces mayor al del caso con el tiempo de integración bajo.

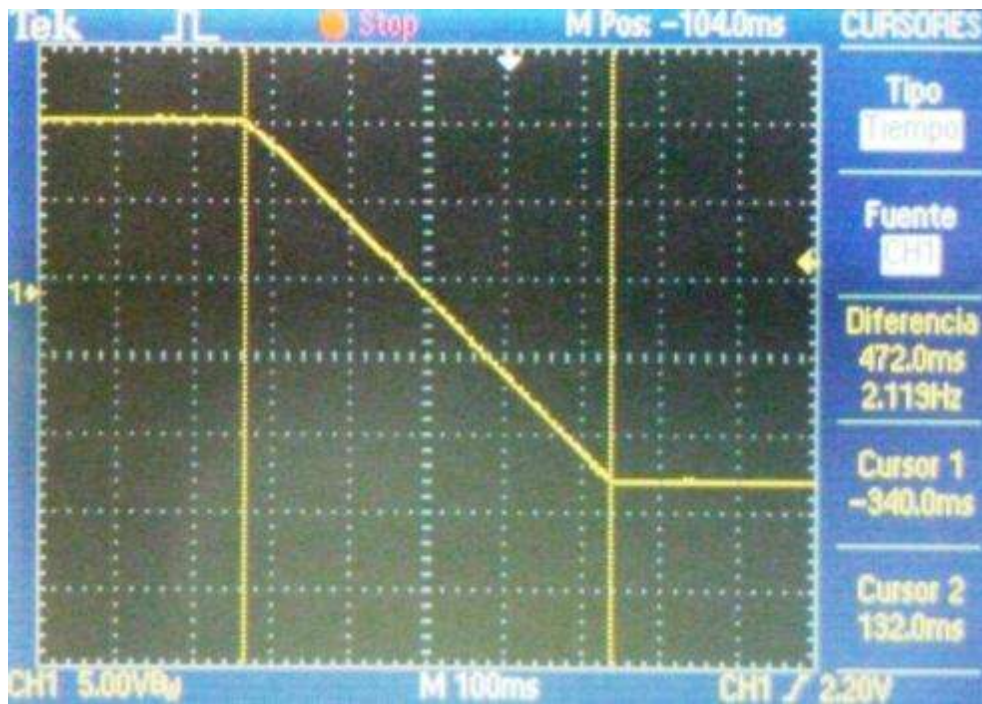


Figura 4.10: Tiempo de Saturación OP4:  $V_{IN} = 10\text{mV}$ ,  $\tau=1\text{ms}$ .

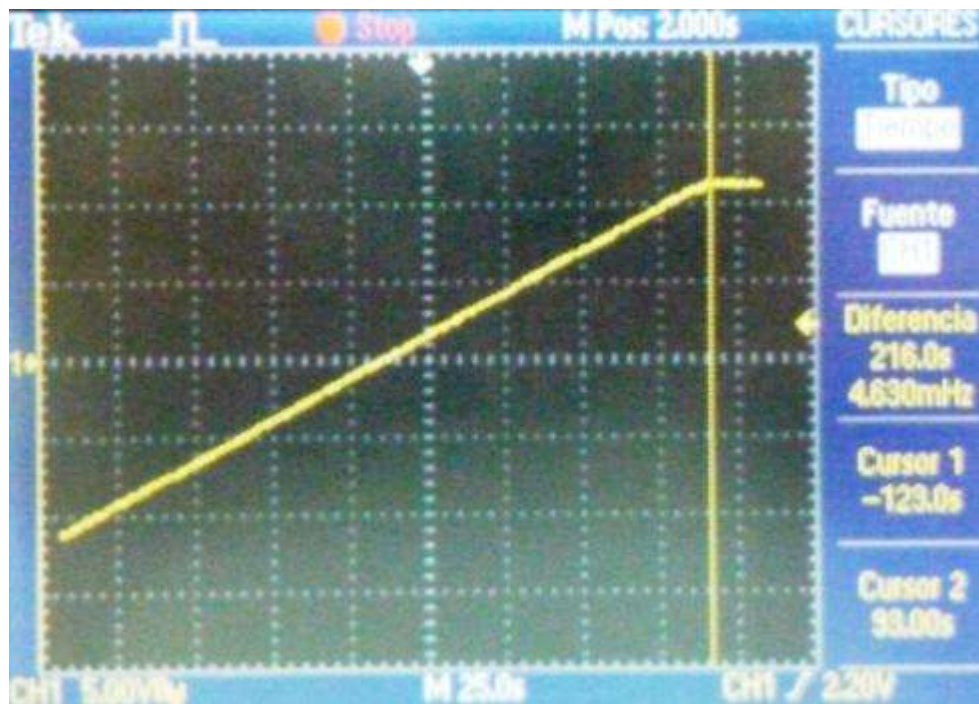


Figura 4.11: Tiempo de Saturación OP4:  $V_{IN} = 10\text{mV}$ ,  $\tau=100\text{ms}$ .

En esta prueba, al integrar un valor DC y según la ecuación de funcionamiento del integrador a base de amplificadores operacionales (ecuación A.1-9 anexos) se tiene:

$$V(t) = -\frac{V_{IN} \cdot t}{RC} + V_0 \quad (4.1-6)$$

Ahora, dado que en la prueba los análisis son desarrollados, independientemente del valor inicial del voltaje y lo que interesa es el tiempo de integración, se puede tomar  $V_0 = 0V$  y por tanto tener una función lineal de voltaje de salida en el tiempo, de esto puede despejarse una expresión para el tiempo de saturación, dado que este es el tiempo necesario para que el voltaje de salida sea el voltaje de saturación, esta expresión está dada por:

$$T_{SAT} = -\frac{V_{SAT}}{RC \cdot V_{IN}} \propto \frac{1}{V_{IN}} \quad (4.1-7)$$

Para el caso de tiempo integración de 1ms se espera por tanto una expresión de la forma:

$$T_{SAT} = 0.024V_{IN}^{-1} \quad (4.1-8)$$

De los datos recopilados en la prueba, se obtiene la curva de mejor ajuste:

$$T_{SAT} = 0.0248V_{IN}^{-0.971} \quad (4.1-9)$$

Esta expresión cuenta con un porcentaje de error del 3.65% con respecto a su equivalente de la forma 4.1-8. Para el caso de tiempo de integración de 100ms se espera una expresión de la forma:

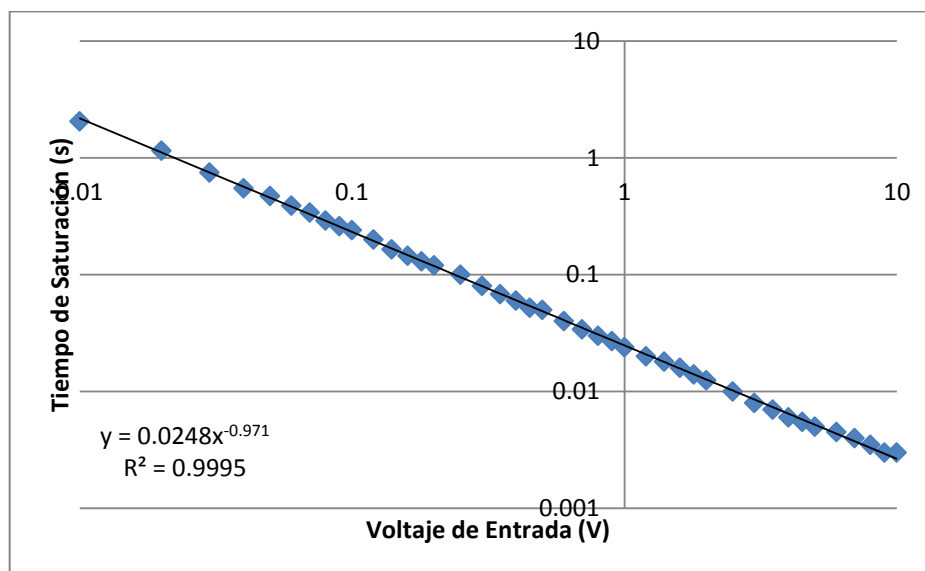
$$T_{SAT} = 245V_{IN}^{-1} \quad (4.1-10)$$

Al realizar la prueba se una curva de mejor ajuste de la forma:

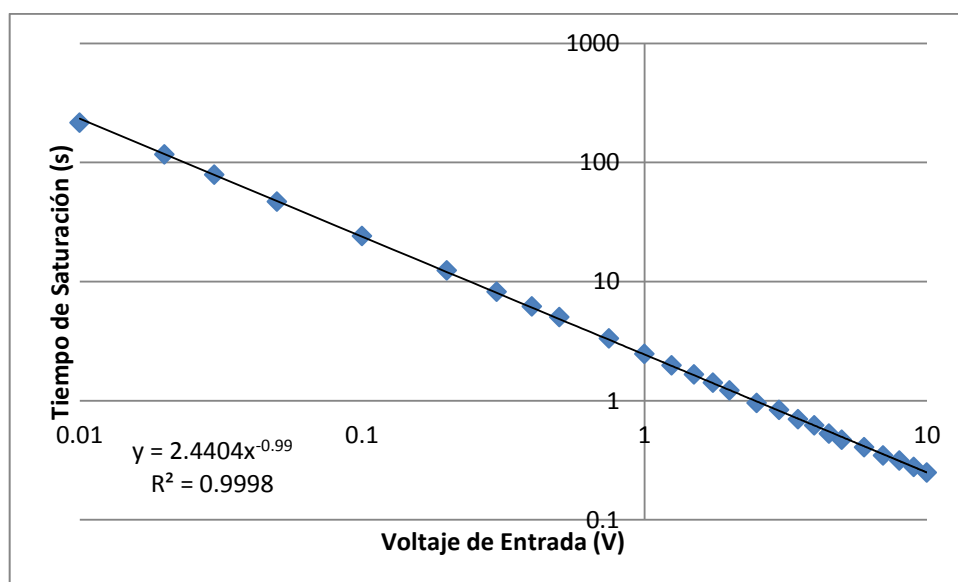
$$T_{SAT} = 2.4404V_{IN}^{-0.990} \quad (4.1-11)$$

Se determina en este caso un 2.81% de porcentaje de error. Para ambos casos se determina que el sistema funciona de buena manera siguiendo la curva teórica esperada.

En las figuras 4.12 y 4.13 se resumen los datos obtenidos en las pruebas DC.



**Figura 4.12: OP4: Controlador Integral, Saturación en DC,  $\tau=1\text{ms}$**



**Figura 4.13: OP4: Controlador Integral, Saturación en DC,  $\tau=100\text{ms}$**

Posterior a la prueba en DC se realiza una prueba en frecuencia, para notar el comportamiento del sistema al aplicársele corriente alterna. Es de esperar en este caso, dado que el sistema es un integrador, que se comporte como un polo en el origen, por lo que al desarrollar un diagrama de Bode de ganancia, se obtendrá una función de la forma:

$$|V_{OUT}| = \left| \frac{K}{s} \right| \propto \left| \frac{1}{f} \right| \quad (4.1-12)$$

Esta función genera la ecuación de una línea de pendiente negativa en el diagrama de Bode.

De la misma forma que en el análisis DC, se realizan dos pruebas, una con el tiempo de integración mínimo y otra con el máximo. Se utiliza en esta prueba una onda sinusoidal de 500mV de amplitud y frecuencia variable

La primera prueba genera la curva de mejor ajuste:

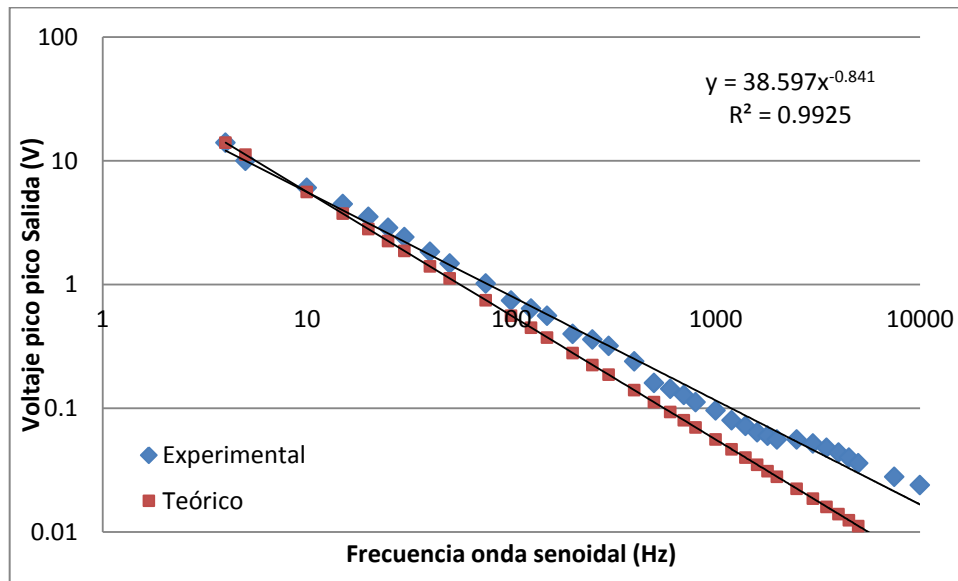
$$|V_{OUT}| = 38.597V_{IN}^{-0.841} \quad (4.1-13)$$

Para el caso del tiempo de integración de 100ms se obtiene la curva de mejor ajuste:

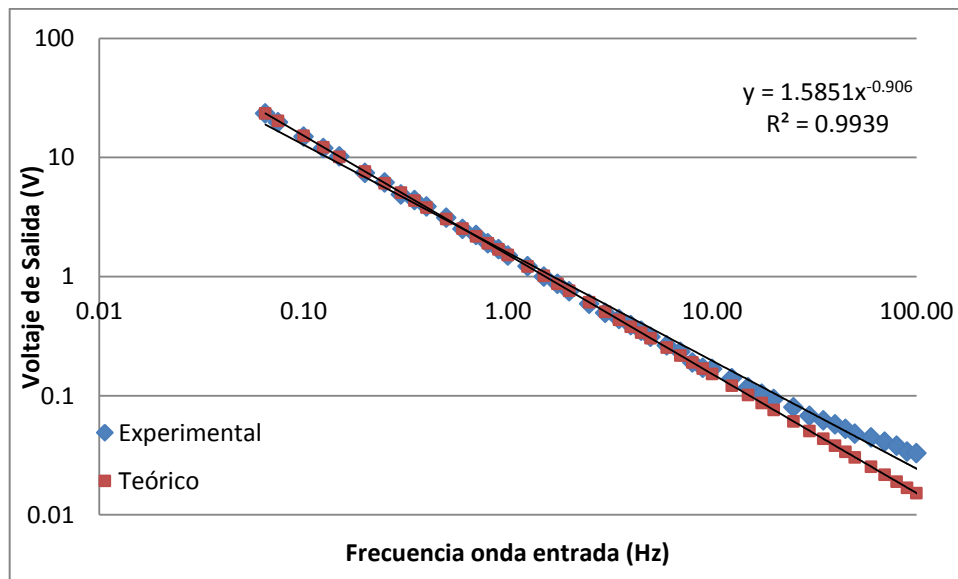
$$|V_{OUT}| = 1.5851V_{IN}^{-0.906} \quad (4.1-14)$$

En ambos casos la relación no es tan buena como en el caso DC, esto debido a que como el voltaje de salida disminuye rápidamente con el aumento de frecuencia, para valores altos de frecuencia, resultaba complicado verificar el voltaje obtenido y puede verse en la figura 4.14 y 4.15, como a frecuencias altas en donde la salida esperada es de decenas de miliVolt, los valores de salida medidos son más altos a los teóricos esto dado a que se cuenta con la suma del ruido y la señal real.

En las figuras 4.14 y 4.15 se incluye un resumen de los datos obtenidos, es posible notar en estas, como se dijo anteriormente como para frecuencias altas el error se ve acrecentado.



**Figura 4.14: OP4: Controlador Integral, Prueba barrido de frecuencia AC,  $\tau=1\text{ms}$**



**Figura 4.15: OP4: Controlador Integral, Prueba barrido de frecuencia AC,  $\tau=100\text{ms}$**

Es de importancia hacer notar como al aumentar el tiempo de integración, el ámbito de operación del integrador se ve disminuido y por tanto las tensiones de frecuencia mayor se verán amplificadas de menor manera. Para este caso se considera que el caso con tiempo de integración bajo es aceptable, pero se tiene en mente la posibilidad de utilizar tiempos de integración menores cuando se desee hacer barridos a mayor frecuencia de operación.

La últimas prueba realizada al circuito integrador son del tipo visuales, en donde se aplica una tensión de forma conocida (sinusoidal, cuadrada y rampa en este caso) y se verifica la forma del voltaje de salida. En estas pruebas no se realiza un análisis cuantitativo sino que se busca únicamente verificar rápidamente la función desarrollada por el amplificador operacional.

La primer prueba es aplicando un voltaje sinusoidal, puede verse en este caso (figura 4.16), que se aplica un voltaje (celeste) y la salida (amarilla) se encuentra desfasada  $90^\circ$  y por tanto en cada máximo o mínimo de la entrada se presenta un cero de la salida.

La segunda prueba se realiza con un voltaje de entrada de forma onda cuadrada bipolar, al integrar esta, lo que se obtiene es una onda triangular como puede verse en la figura 4.17. A diferencia de la prueba anterior, en esta, es posible notar la inversión de signo propia de la integración por amplificador operacional (ver ecuación A.1-9 sección de anexos) en donde en la sección donde la onda cuadrada es negativa, en la salida se tiene una pendiente positiva y viceversa.

Por último se utiliza una onda tipo rampa o sierra, a la salida se obtienen funciones cuadráticas con concavidad negativa, esto de nuevo debido a la inversión propia del integrador desarrollado a base de amplificadores operacionales, ver figura 4.18.

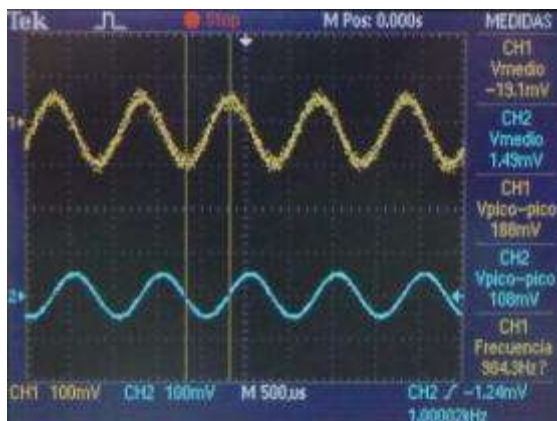


Figura 4.16: OP4: Control Integral, voltaje sinusoidal

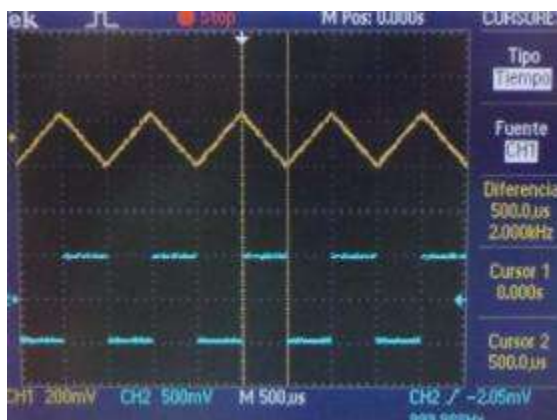


Figura 4.17: OP4: Control Integral, onda cuadrada bipolar

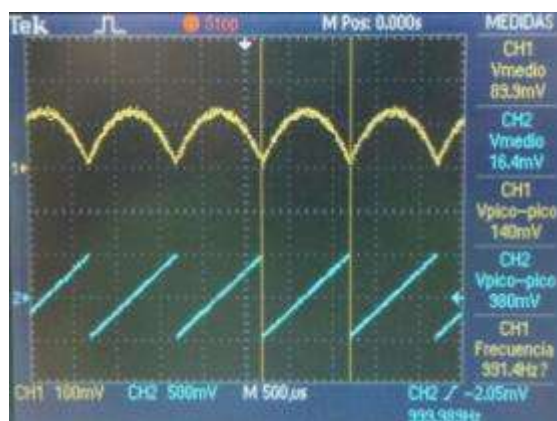


Figura 4.18: OP4: Control Integral, voltaje tipo rampa



Operacional OP5: Amplificador Variable de Salida

La función de este operacional es similar a la esperada por el OP3 (Amplificador Control Proporcional) y por tanto se realizan dos pruebas variando la resistencia desde 9.86kΩ a 100.7kΩ, en la primera se utiliza un voltaje de entrada de 1V y en la segundo uno de -1V lo que logra generar una variación en todo el ámbito de voltaje de amplificador.

Al realizar las pruebas se obtienen los datos de saturación de la tabla 4.5

**Tabla 4.5: Saturación OP5: Controlador Proporcional**

	Resistencia (kΩ)	Voltaje (V)
Saturación Positiva	98.5K	11.00
Saturación Negativa	100.7K	-11.40

Al realizar la prueba para  $V_{IN} = 1V$ , se obtiene la ecuación de funcionamiento:

$$V_{OUT} = -0.1351V_{IN} + 0.1583 \quad (4.1-15)$$

Lo que genera un porcentaje de error del 8.3%. Para el caso  $V_{IN} = -1V$ .

$$V_{OUT} = 0.1134V_{IN} - 0.3152 \quad (4.1-16)$$

Para este caso se obtiene un 5.2% de error.

De la misma forma que en el caso del OP3, aún y cuando el porcentaje de error es considerable, debido a que las funciones descritas son claramente lineales se determina finalmente que el sistema funciona de buena manera y se ajusta a las especificaciones esperadas al diseñar.

En las figuras 4.19 y 4.20 se tiene un resumen de la prueba desarrollada.

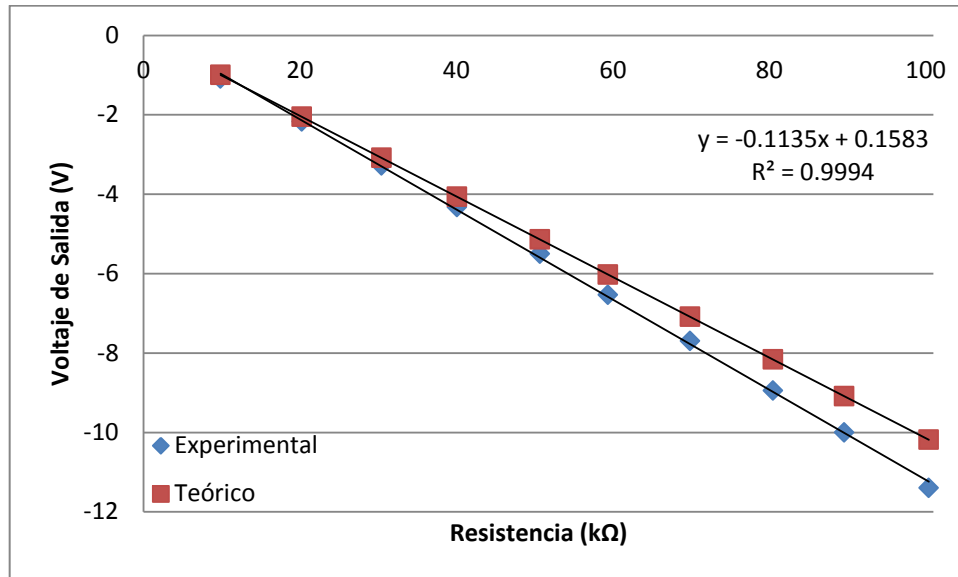


Figura 4.19: OP5: Prueba Amplificador Salida,  $V_{IN} = 1V$

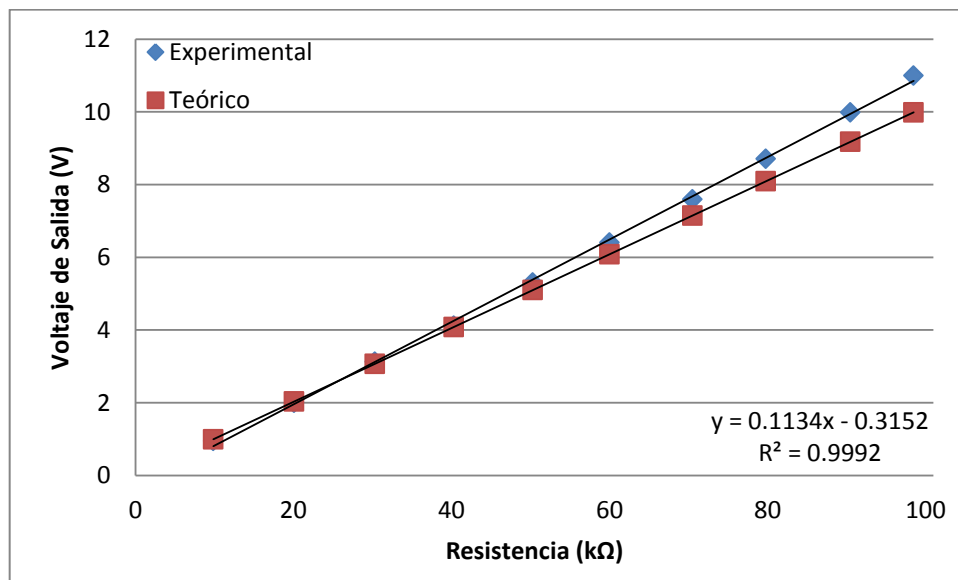


Figura 4.20: OP5: Prueba Amplificador Salida,  $V_{IN} = -1V$

### Operacional OP9: Amplificador Transimpedancia

El amplificador de transimpedancia es el dispositivo electrónico de mayor importancia dentro del microscopio de efecto túnel, de él depende la amplificación de la corriente de tunelaje utilizada para el control del sistema, junto a esto el amplificador de transimpedancia es la mayor fuente de ruido en el sistema y deben tomarse medidas para minimizar este.

Este amplificador realiza la función de tomar una corriente y transformarla en un voltaje, dependiendo de la sensibilidad del amplificador es posible amplificar por factores de  $10^9$  o  $10^{10}$  una corriente, de manera que en esta etapa es posible tomar una corriente de 1nA y convertirla en un voltaje de 1V.

Para verificar el buen funcionamiento del sistema se realizan varias pruebas, la primera de ella toma una corriente sinusoidal de frecuencia constante y varía la amplitud de la onda, la segunda mantiene la amplitud y varía la frecuencia y por último se hacen pruebas para verificar la inmunidad al ruido del sistema, en específico el ruido provocado por tensiones alternas en los contactos del cilindro piezoeléctrico.

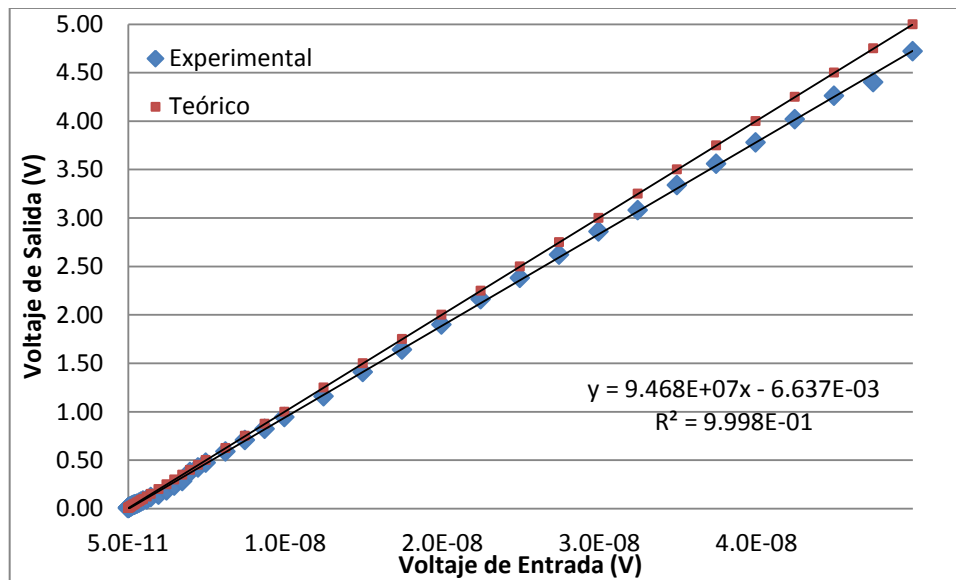
La primera prueba se realiza aplicando una corriente sinusoidal con frecuencia de 1.000kHz en la entrada del amplificador. Es bueno aclarar que para obtener corriente y no voltaje se utiliza una resistencia de  $200M\Omega$  entre la fuente de voltaje y la patilla inversora del amplificador, obteniendo así la configuración típica de un inversor. Al pasar un voltaje por la resistencia, la corriente de salida es reducida por un factor de  $2 \times 10^8$  por lo que se podrá trabajar con corrientes muy bajas al hacer esta implementación.

En específico, dado que la fuente de alimentación cuenta con un mínimo de 10mV pico pico, la corriente mínima con la que se trabaja es de 25pA de amplitud y 50pA pico pico, un valor que se encuentra alrededor de 2 órdenes de magnitud inferior a la corriente de tunelaje esperada para un metal.

Al variar la amplitud de corriente desde 50pA pico pico a 50nA se obtiene la curva de mejor ajuste:

$$V_{OUT} = 9.468 \times 10^7 \cdot I_{IN} - 6.637 \times 10^{-3} \quad (4.1-17)$$

Esta curva (ver figura 4.21) presenta un 9.1% de error con respecto a la expresión esperada ( $V_{OUT} = 10^8 I_{IN}$ ) pero, dado que la curva de mejor ajuste cuenta con un valor alto de correlación y ser determina halla una buena linealidad de la función se concluye que en esta prueba el amplificador funciona de la manera especificada.

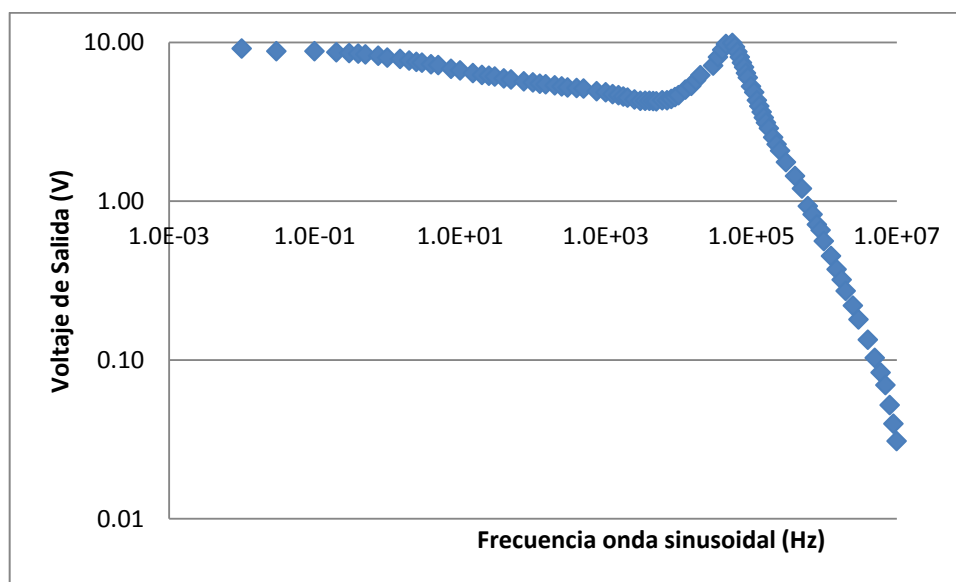


**Figura 4.21: OP9: Transimpedancia, variación amplitud de corriente**

La segunda prueba desarrollada consiste en realizar un barrido en frecuencia para determinar el funcionamiento del sistema y determinar si este se comportase como elemento activo (integrador o derivador) a frecuencias altas.

En la prueba se toma una señal sinusoidal de 50nA de amplitud pico pico y se varía su frecuencia, para determinar el diagrama de Bode de ganancia del sistema. De la prueba se obtienen los datos de la figura 4.22. En esta puede notarse un fuerte pico de resonancia, medido en 46kHz. La presencia del pico de resonancia simboliza la presencia de dos polos en la función de transferencia del amplificador, algo no esperado a la hora de diseñar.

Debido a que los polos se presentan a frecuencias de decenas de kiloHertz no se ve problema para el sistema dado que a lo sumo el microscopio funcionará en el ámbito de las centenas de Hertz, en donde, como es posible ver en la figura 4.22 no se presenta atenuación considerable y por tanto se toma favorablemente la prueba en frecuencia.



**Figura 4.22: OP9: Transimpedancia, barrido de frecuencia**

Debe recordarse que la atenuación percibida en el sistema, a frecuencias menores a 1kHz se atribuye al comportamiento esperado del sistema dado que en la sección 3.1.1 donde se especificaba un tiempo muerto de 1ms, para frecuencias mayores los efectos no son descritos por lo esperado en la ecuación 3.1-2

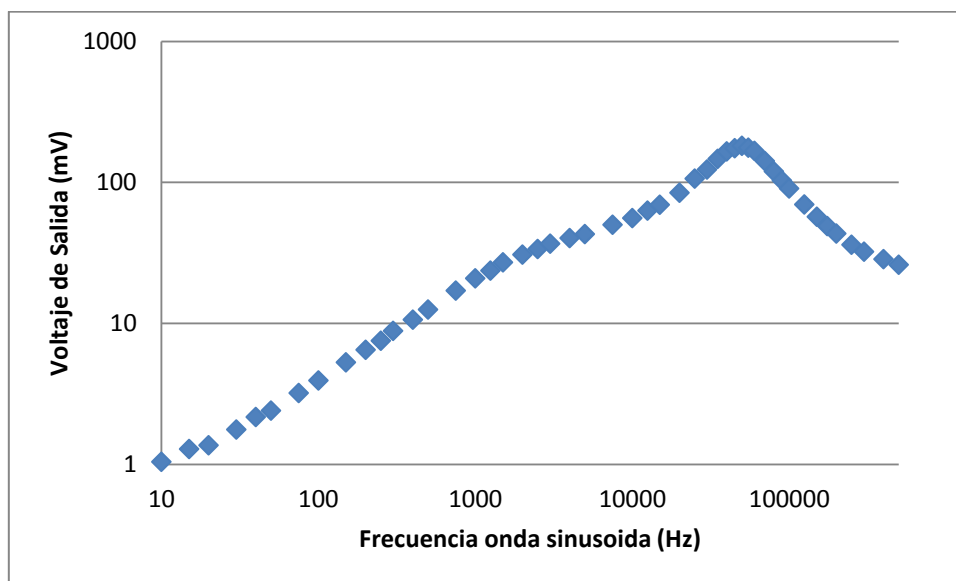
Habiendo determinado que el sistema funciona de buena manera, tanto en condiciones de tensión estática y variable, se procede determinar la susceptibilidad del sistema a ser afectado por señales ajenas a él. En específico, se procederá a aplicar voltaje sinusoidal en las patillas del cilindro piezoeléctrico para determinar en qué medida esta tensión introduce corrientes parasitas al sistema de amplificación.

La primera prueba consiste en aplicar voltaje sinusoidal entre el contacto interior (V\_Z\_PIEZO) y tierra, el voltaje aplicado es de 20V pico pico y su frecuencia variable.

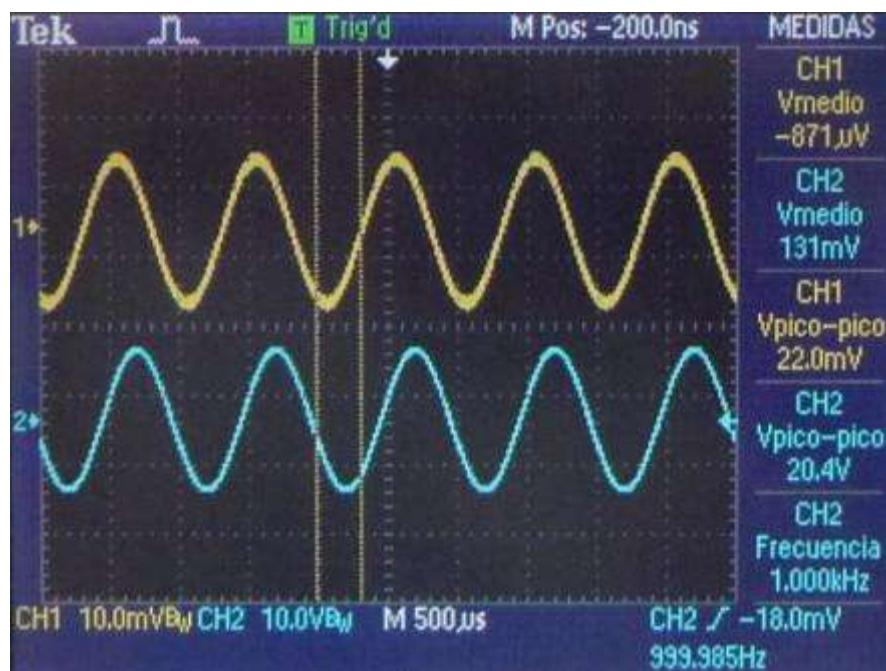
Al realizar esta prueba se obtiene un resultado intrigante (ver figura 4.23), en donde se nota que dependiendo de la frecuencia es posible obtener una salida de voltaje de hasta 181mV a una frecuencia de 50kHz, este voltaje es equivalente a 1.81nA que es mucho mayor a la corriente mínima de funcionamiento que se había verificado (50pA pico pico).

Este ruido se da en un pico de resonancia por lo que a frecuencias menores, se presenta bastante reducido, en específico a 1kHz se tienen 22.0mV (ver figura 4.24) y a 250Hz se tienen 7.5mV.

En la figura 4.24 es posible también notar como se presenta un desfase entre la onda de entrada (celeste) y salida (azul), esto propio de la presencia de los polos en la función de transferencia del sistema de amplificación.



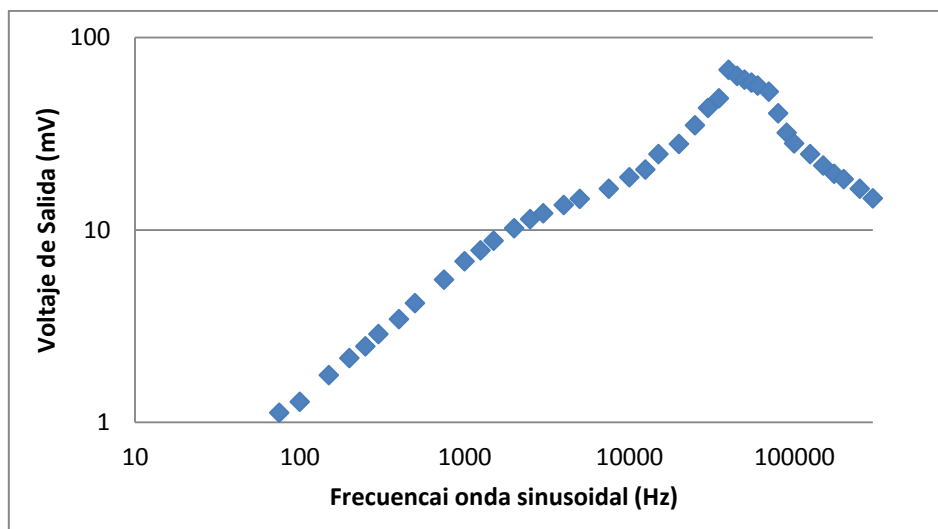
**Figura 4.23: OP9: Transimpedancia, barrido ruido V\_Z\_PIEZO**



**Figura 4.24: OP9: Transimpedancia, barrido de frecuencia**

La última prueba desarrollada consiste en el equivalente a la anterior pero variando los pines conectados, en este caso se aplica la tensión sobre dos de los pines externos del

cilindro piezoeléctrico, al igual que en la prueba pasada se presenta un pico de resonancia pero esta vez a 40kHz y con una amplitud de 68mV, una tercera parte de la anterior.



**Figura 4.25: OP9: Transimpedancia, barrido ruido  $\pm V_X$  PIEZO**

De estas últimas pruebas es posible notar que existe una fuente considerable de ruido proveniente de los contactos del piezoeléctrico por lo que manteniendo el diseño actual se recomienda utilizar una frecuencia de barrido inferior al kiloHertz. Lo bueno de esto es que la frecuencia de un kiloHertz es el límite del controlador integral y por tanto este sistema no generará picos de frecuencias altas, dado que estos se verán atenuados. Por tanto, se determina que, el diseño actual ha de funcionar de buena manera, con un ruido aceptable en frecuencias de hasta 1kHz, para frecuencias mayores será necesario modificar un poco la electrónica y desarrollar sistemas simples para la eliminación de ruido entre los contactos, por ejemplo recubrir la patilla de la punta con un material metálico para asemejar una jaula de Faraday y mejorar su inmunidad al ruido, esto se considerará más adelante en la sección de recomendaciones (Capítulo 5).



### *Pruebas etapa conversión analógica a digital*

Para poder realizar el análisis superficial en el microscopio de efecto túnel es necesario monitorear dos variables de importancia, la primera es el valor de voltaje aplicado en la patilla Z del cilindro piezoeléctrico, esto dado que de este voltaje depende la posición en el eje Z de la punta. La segunda variable a verificar es la corriente de efecto túnel actual que describe cuan cercana está la punta a la muestra.

Estas dos variables son monitoreadas y tabuladas haciendo uso de un convertidor Analógico- Digital, este sistema cuenta con un ámbito de operación de  $\pm 2.5V$  por tanto es necesario disminuir el valor de las señales desde  $\pm 12V$ . Para realizar esto se utilizará un inversor que reduzca el voltaje por un factor de 6, por lo que un valor de 12V equivaldrá a 2V que es fácilmente convertido por el sistema ADC. Se escoge el factor de seis dado que proporciona la libertad de aumentar el voltaje de alimentación a  $\pm 15V$  y aún poder realizar la conversión de buena manera.

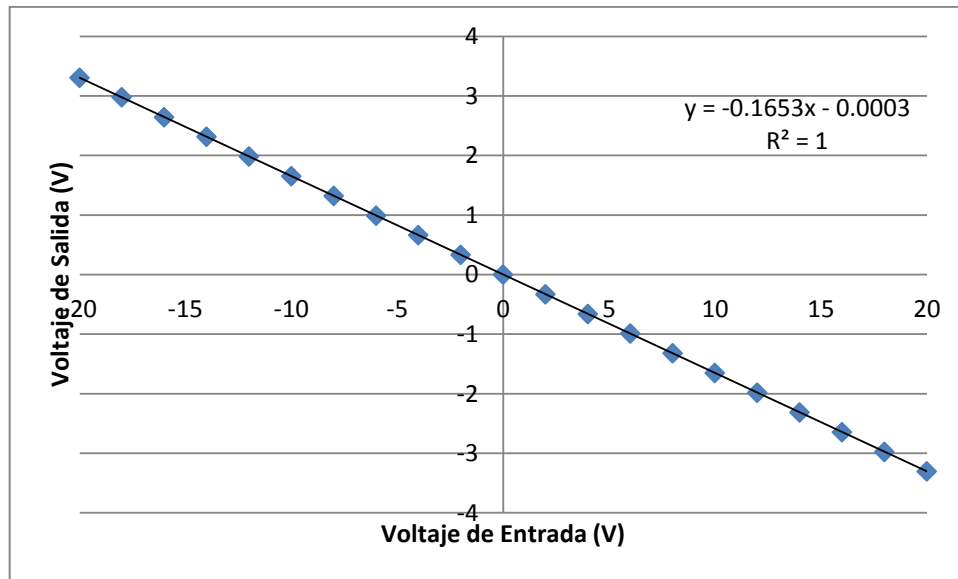
### *Operacional OP6: Salida ADC V-Z-PIEZO*

El amplificador OP6 es el primero de estos reductores de voltaje y cuenta con una ganancia de  $-1/6$  por esta razón, en el ámbito de  $\pm 20V$  (correspondiente al ámbito de voltaje de la fuente utilizada) no se presenta saturación de voltaje en el amplificador.

La prueba realizada consiste en variar el voltaje desde  $-20V$  a  $+20V$  y verificar el voltaje de salida del sistema, obteniendo la curva de mejor ajuste siguiente:

$$V_{OUT} = -0.1653V_{IN} - 0.0003 \quad (4.1-18)$$

Los resultados obtenidos se muestran de mejor manera en la figura 4.26 y cuentan con un porcentaje de error del 0.85%, algo bastante deseable.



**Figura 4.26: OP6: Prueba Salida ADC V-Z-PIEZO**

Operacional OP7: Inversor Salida ADC V-Z-PIEZO

Debido a que en el amplificador OP6 se genera una inversión de la señal, es necesario introducir un inversor antes de poder enviar la señal a la conversión analógica a digital.

En este caso sí se obtiene saturación dado que la ganancia de este punto es de -1, los datos de esta saturación se incluyen en la tabla 4.6

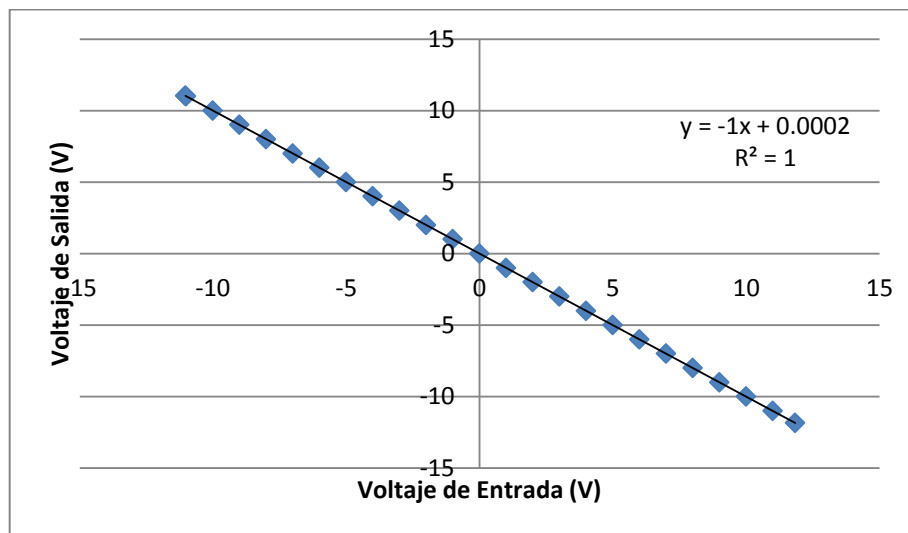
**Tabla 4.6: Saturación OP7: Inversor Salida ADC V\_Z\_PIEZO**

	$V_{IN} (V)$	$V_{OUT} (V)$
Saturación Negativa	-11.03	-11.03
Saturación Positiva	11.84	11.84

Al realizar la prueba se determina que el sistema trabaja de muy buena manera con un porcentaje de error de 0.03% y una curva de mejor ajuste de la forma:

$$V_{OUT} = -1.0000V_{IN} + 0.0002 \quad (4.1-19)$$

Los datos obtenidos en esta prueba se exponen en la figura 4.27



**Figura 4.27: OP7: Prueba Inversor Salida ADC V-Z-PIEZO**

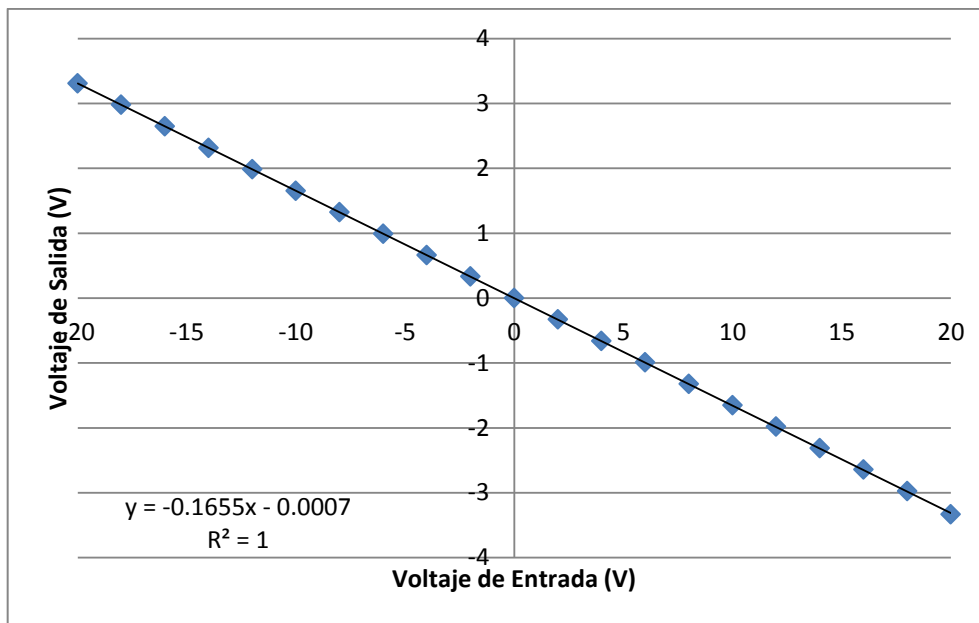
#### Operacional OP8: Salida ADC I-TUNEL

La segunda señal que debe monitorearse mediante conversión digital a analógica es la corriente de efecto túnel. Para esto se toma la señal a la salida del amplificador de transimpedancia OP9. Como esta salida, es proporcional al negativo de la corriente de efecto túnel presente en el sistema, no será necesaria una etapa de inversión para la señal, por lo que únicamente se reducirá el voltaje en un factor de 6 para poder utilizarlo en el análisis.

Como en la prueba anterior, se varía el voltaje desde -20V a +20V y se verifica el voltaje de salida del sistema, obteniendo la curva de mejor ajuste siguiente:

$$V_{OUT} = -0.1655V_{IN} - 0.0007 \quad (4.1-20)$$

Los resultados obtenidos se muestran de mejor manera en la figura 4.28 y cuentan con un porcentaje de error del 0.79%.



**Figura 4.28: OP8: Prueba Salida ADC I-TUNEL**

### **Pruebas amplificadores barrido superficial**

El barrido superficial, en los eje X y Y de la muestra se realiza mediante el uso de convertidores Digital a Analógico en el microcontrolador. Estos convertidores cuentan con un ámbito de voltaje de 5V por lo que si se utilizase solamente este ámbito de voltaje se podrían barrer solamente 181nm en cada eje.

Para aumentar este ámbito de barrido se introduce una etapa de amplificación que pasa de un ámbito de 5V a uno de 30V (con un voltaje de alimentación de por lo menos  $\pm 15V$ ) logrando así barrer una superficie de 1086nm, 6 veces más que lo que era posible con el convertidor DAC.

El aumento del ámbito de barrido se realiza mediante la utilización de los amplificadores OP10 y OP11. El OP10 cuenta con una ganancia de 3, mientras que el OP11 se diseña con una ganancia de -3. Por tanto, al conectar la salida del OP10 al pin positivo del piezoeléctrico y la salida del OP11 al pin negativo se tendrá una diferencia de potencial de hasta 30V entre las patillas del piezoeléctrico, generando una ganancia de 6, como se había especificado anteriormente.

Dado que el barrido superficial se realiza en dos ejes de manera simultánea, es necesario implementar dos veces el sistema compuesto por los amplificadores OP10 y OP11, uno para el eje X y otro para el eje Y. Por esta razón las pruebas realizadas al sistema se deberán de realizar en forma paralela para cada juego de amplificadores.

Operacionales OP10x, OP11x: Amplificadores V-EJE-X

En esta prueba se procede a variar el voltaje de entrada, desde -4V a +4V, a la entrada de los amplificadores OP10x y OP11x, que se encuentran cortocircuitadas entre sí, debido a que se utiliza un valor de alimentación de  $\pm 12V$ , la saturación se presenta a voltajes menores de los 4V, estos valores de saturación se presentan en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7: Saturación OP10x, OP11x: Amplificadores V-EJE-X**

	$V_{IN} (V)$	$V_{OUT} (V)$
Saturación Negativa	-3.96	-12.00
Saturación Positiva	3.66	11.00

Al realizar la prueba y utilizando únicamente los valores no saturados en el análisis, se obtiene la curva de mejor ajuste, para el operacional OP10 (positivo).

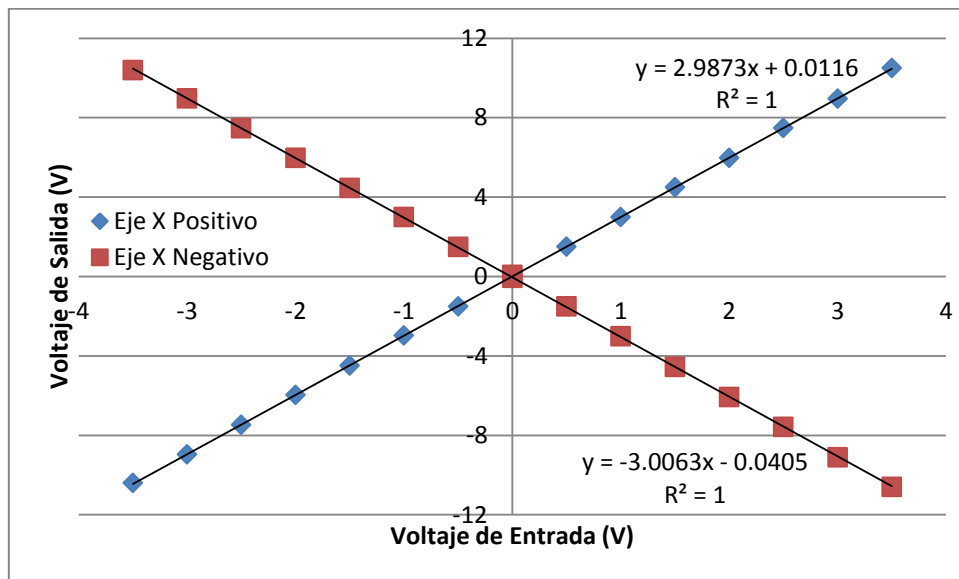
$$V_{OUT+} = 2.9873V_{IN} - 0.0116 \quad (4.1-21)$$

Con esto se determina un 0.36% de porcentaje de error con respecto a la ecuación ideal. Para el amplificador OP11 (negativo) se obtiene la curva de mejor ajuste:

$$V_{OUT-} = 3.0063V_{IN} + 0.0405 \quad (4.1-22)$$

Se determina para este amplificador un 0.72% de porcentaje de error. Estos valores se ajustan de buena manera al diseño realizado y por tanto se determina que el sistema funciona de la manera especificada.

Es importante notar que debido a que se utilizarán los dos amplificadores de manera conjunta, en cada punto, el voltaje al que se encuentra sujeto el piezoeléctrico, es la diferencia entre las dos curvas de la figura 4.29, y puede verse que dado que las curvas generadoras son lineales, la tensión aplicada será lineal con respecto al cambio de voltaje.



**Figura 4.29: OP10x, OP11x: Prueba Amplificadores V-EJE-X**

Operacionales OP10y, OP11y: Amplificadores V-EJE-Y

De manera análoga al caso anterior se procede a variar la tensión de entrada desde, -4V a +4V y se encuentran los valores de saturación expuestos en la tabla 4.8

**Tabla 4.8: Saturación OP10y, OP11y: Amplificadores V\_EJE\_Y**

	$V_{IN} (V)$	$V_{OUT} (V)$
Saturación Negativa	-3.97	-12.00
Saturación Positiva	3.66	11.00

Al realizar la prueba para el sistema se obtiene la curva de mejor ajuste para el operacional OP10 (positivo).

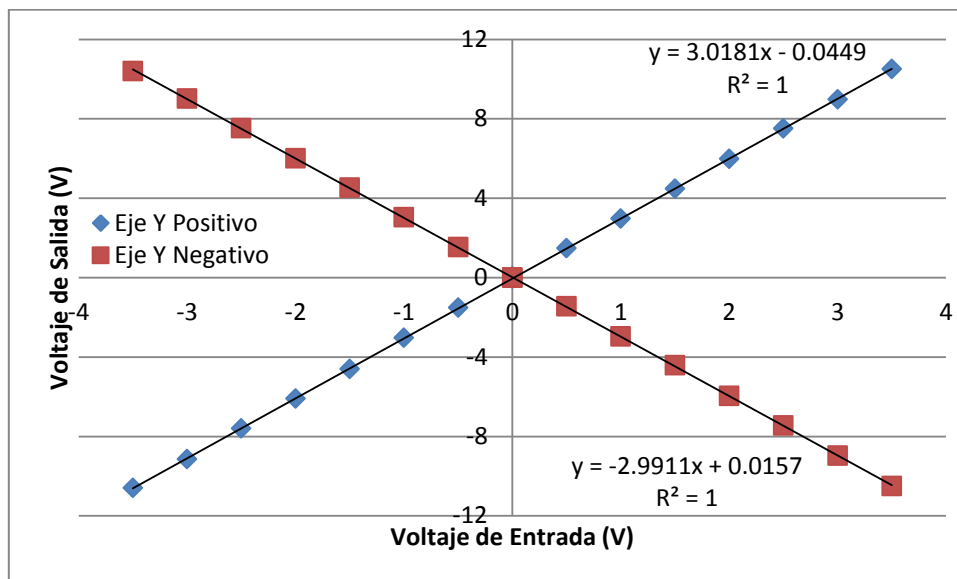
$$V_{OUT+} = 3.0181V_{IN} - 0.0449 \quad (4.1-23)$$

Con esto se determina un 1.01% de porcentaje de error con respecto a la ecuación ideal. Para el amplificador OP11 (negativo) se obtiene la curva de mejor ajuste:

$$V_{OUT-} = 2.9911V_{IN} + 0.0157 \quad (4.1-24)$$

Se determina para este amplificador un 0.88% de porcentaje de error. De la prueba por tanto se determina que el sistema funciona acorde a lo deseado por el diseño y por tanto se acepta la implementación como atinada.

En la figura 4.30 se incluye un resumen de la prueba desarrollada



**Figura 4.30: OP10y, OP11y: Prueba Amplificadores V\_EJE\_Y**

Operacional OP12: Seguidor Voltaje de Bias

El voltaje de bias es un factor importante en el desarrollo de la corriente de tunelaje, según la ecuación 2.2-10, para pequeñas tensiones, la corriente de efecto túnel debe variar de forma lineal con la tensión, por esta razón se utilizan tensiones bajas para generar el tunelaje y el ámbito de 5V de los convertidores DAC del microcontrolador en realidad son más que suficientes, por esta razón el OP12 es un seguidor de voltaje que únicamente toma el voltaje del microcontrolador y lo pasa de forma directa al sustrato.

Para esta prueba, se hace un barrido desde -12V a 12V y se determinan los valores de saturación de la tabla 4.9

**Tabla 4.9: Saturación OP12: Seguidor Voltaje de Bias**

	$V_{IN}$ (V)	$V_{OUT}$ (V)
Saturación Negativa	-11.91	-11.89
Saturación Positiva	11.2	11.15

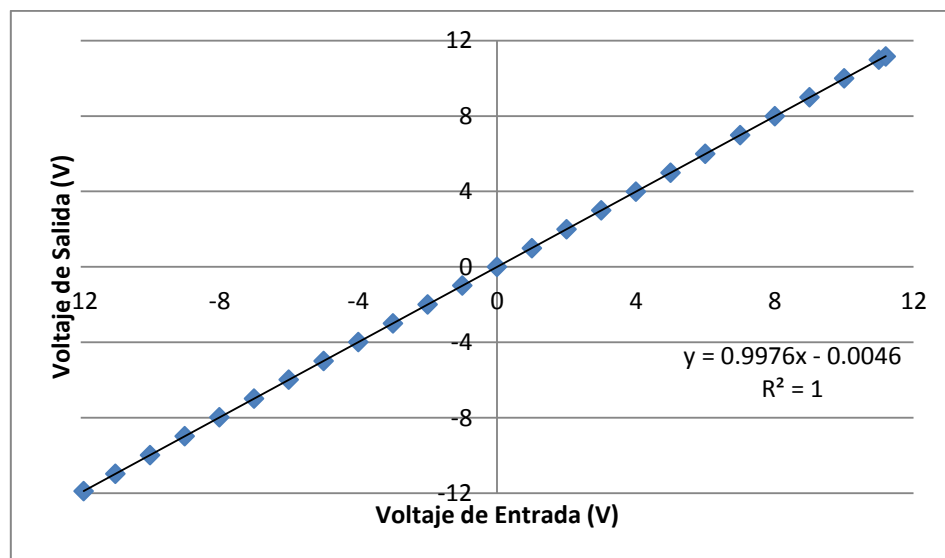


Por su parte al realizar la prueba se encuentra también que el sistema describe la curva de mejor ajuste:

$$V_{OUT} = 0.9976V_{IN} - 0.0046 \quad (4.1-25)$$

Junto a esto se determina un 0.28% de porcentaje de error, muy apegado a lo esperado para el seguidor de voltaje por lo que se concluye que el sistema es fiel a las especificaciones del diseño.

En la figura 4.31 se incluye un resumen de los datos en el cual se puede notar el apego experimental a lo esperado teóricamente.



**Figura 4.31: OP12: Seguidor Voltaje de Bias**

Fuera de estas pruebas se realizaron pruebas para el cilindro piezoeléctrico y se verificó el buen funcionamiento del sistema de tunelaje, logrando así verificar el fin primordial de la electrónica del microscopio de efecto túnel. Estas pruebas se describirán a continuación.

### Pruebas Piezoeléctrico

El cilindro piezoeléctrico adquirido, cuenta con las especificaciones de la sección 3.3.2, utilizando el cilindro piezoeléctrico BMT527 0260 0210 1000. Este cilindro, en conjunto con los contactos propios de este se muestra en la figura 4.32.

Es importante notar que debido a la baja temperatura de Curie del material BM527, para fijar los contactos al cilindro piezoeléctrico se utiliza un epoxi conductor de plata que se puede curar a temperatura ambiente, se puede ver este material gris que representa el contacto eléctrico en la superficie del piezoeléctrico, fuera de este cuidado térmico el cilindro es bastante resistente y estable a la hora de trabajar con este.

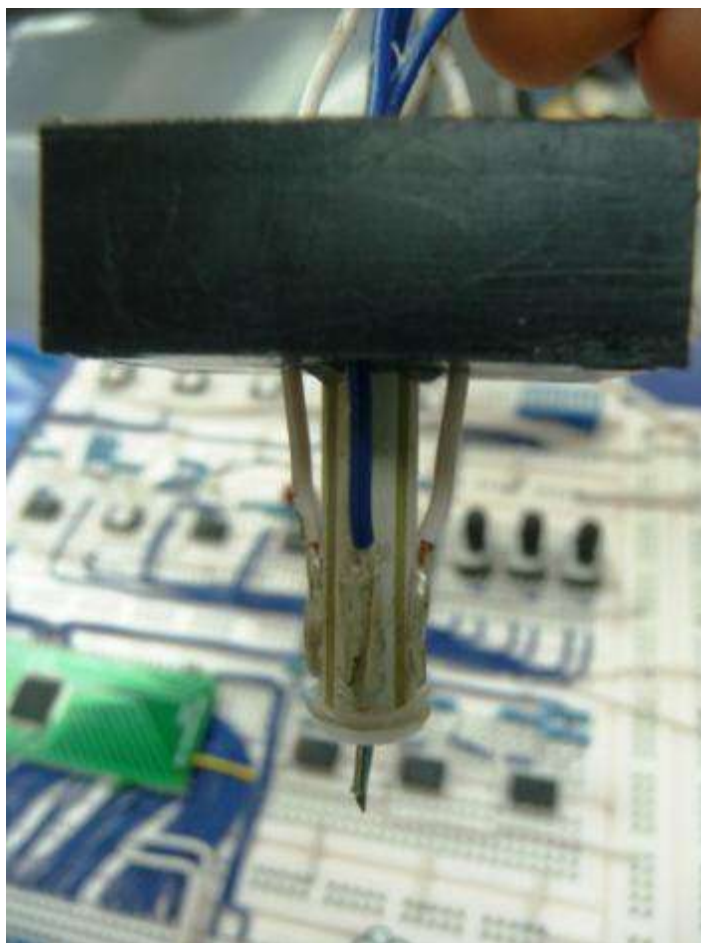
Para verificar el funcionamiento real del cilindro se utilizan ondas sinusoidales de 10V pico a pico y de frecuencia variable, al aumentar la frecuencia es posible notar como se empieza a presentar un sonido audible hasta llegar a un punto donde se obtiene un máximo, que puede verse como un pico de resonancia, la prueba se realiza utilizando un micrófono y viendo la intensidad sonora registrada por el mismo. La prueba en si no es muy robusta dado que no es posible determinar la intensidad del sonido, pero da una idea del comportamiento mecánico en frecuencia del cilindro piezoeléctrico.

Dependiendo de los contactos utilizados para la prueba, se obtienen las frecuencias de resonancia dadas en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10: Piezoeléctrico frecuencia resonancia del cilindro**

<i>Modo de vibración</i>	<i>Frecuencia (Hz)</i>
Perpendicular al eje Z	9,8kHz
Paralelo al eje Z	13.2kHz

De esta prueba lo importante era verificar que el cilindro piezoeléctrico en efecto se encuentra operativo (lograr oír un sonido al conectar el piezoeléctrico) y por tanto resulta posible utilizarlo para las funciones de barrido superficial, es importante notar que dado que el sistema será utilizado a frecuencias menores a un kilo Hertz, no es necesario preocuparse por resonancias mecánica en el cilindro piezoeléctrico.



**Figura 4.32: Cilindro piezoeléctrico con contactos**

### **Pruebas Jaula de Faraday**

Como se mencionó anteriormente el amplificador de transimpedancia es un sistema propenso al ruido, por tanto para reducir al máximo la presencia de este, se diseñó una jaula de Faraday que no deje pasar las ondas electromagnéticas y así logra que el sistema mejore su relación señal ruido y por tanto la calidad de la señal de salida del amplificador.

Para desarrollar la jaula se toma como base una caja de cartón, la cual primeramente es cubierta con plástico adhesivo para mejorar la estabilidad de la superficie, posteriormente se envuelve en tres capas de papel aluminio teniendo el cuidado de que el aluminio no se rompa o desgarre, por último se vuelve a utilizar plástico adhesivo para lograr mejorar las capacidades mecánicas de la jaula y evitar así que se rompa el papel aluminio y se pierda la capacidad de repeler ondas en la jaula de Faraday.

La jaula cuenta con dos partes, una superior que consiste en la caja recubierta de plástico y aluminio y la segunda que consiste en una lámina ancha de Styrofoam recubierta de tres capas de aluminio y plástico. Esta lámina se posiciona como base para el sistema de microscopía (ver figura 4.1), sobre esta se posiciona el sistema de aislamiento vibracional, la cabeza del microscopio y por último se posiciona la caja recubierta de aluminio (ver figura 4.33). Es importante notar que dado que la caja no se diseña con una salida para el cable de alimentación, debe tenerse cuidado para que al posicionar la caja por encima no se mueva la cabeza de barrido.

Para probar el sistema y dado que no se contaba con un sistema de medición de ruido, se realizan varias pruebas, la primera que consiste en conectar el amplificador de transimpedancia dentro y fuera de la jaula, con la patilla de entrada aterrizada y luego hacer

lo mismo con el amplificador dentro de la jaula. En esta prueba, inicialmente se cuenta con 30mV pico pico de ruido electromagnético, al introducirlo en la jaula, el voltaje de ruido se disminuye de gran manera pasando a ser de 9mV pico pico por lo que se nota que el sistema disminuye de buena manera el ruido en el sistema.

La segunda prueba desarrollada, que es una simple prueba para determinar la eliminación de las ondas dentro de la jaula consiste en introducir un teléfono celular, en una zona con buena cobertura celular, dentro de la jaula y proceder a llamarlo. En este caso no se logra realizar la llamada por lo que se concluye que la jaula funciona de buena manera.

De estas pruebas se concluye que el sistema funciona de buena manera evitando la entrada de ruido electromagnético al sistema de amplificación de transimpedancia.

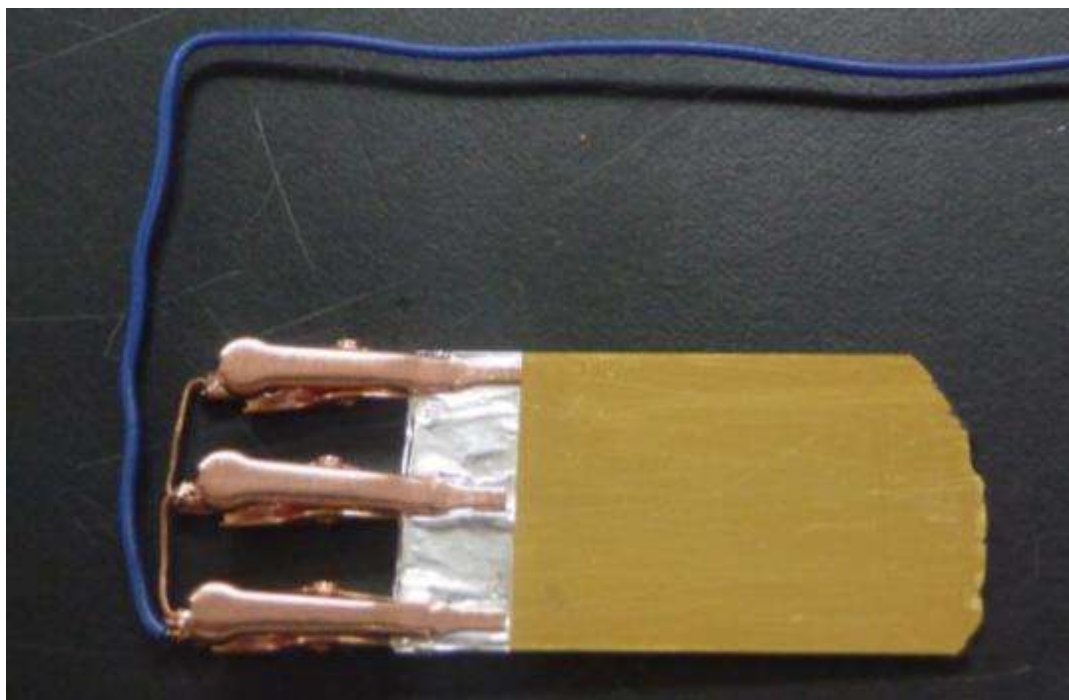


**Figura 4.33: Jaula de Faraday del sistema de microscopía**

### Pruebas Tunelaje

Habiendo concluido que el sistema de amplificación de transimpedancia funciona de buena manera y que es posible disminuir el ruido mediante el uso de sistemas como la Jaula de Faraday se procede a verificar el funcionamiento del sistema de microscopía y probar si es posible mantener estable la corriente de túnel en el sistema.

Para realizar la prueba se utiliza una muestra de oro depositada por electrodeposición en un substrato de vidrio (ver figura 4.34) y conectada eléctricamente mediante el uso de pinzas de cobre que sujetan papel aluminio a la superficie para mejorar el contacto eléctrico. Junto a la muestra se utiliza una punta de tungsteno desarrollada a base de cable de 0.03” de diámetro y cortada en ángulo minutos antes de la prueba para evitar la oxidación de la superficie (ver figura 4.35).



**Figura 4.34: Muestra de oro sobre substrato de vidrio**



**Figura 4.35: Acercamiento punta de Tungsteno**

Para verificar la posibilidad de tunelaje se procede a acercar la punta, primero con los tornillos de acercamiento grueso (los cercanos a la punta), hasta que no sea posible notar la cuan cercana se encuentra la punta de la muestra, posterior a esto se procede a acercar la punta mediante el movimiento del tornillo trasero. Se utilizan voltajes menores a un volt para el bias en esta prueba y se logra verificar tunelaje, esto dado que se presenta un corriente de tunelaje proporcional al voltaje de bias para valores pequeños de tensión.

Debido a que esta prueba se realiza sin el sistema de control, no es posible acerca de buena manera la punta a la muestra esto dado que se presenta el problema de que al tener tunelaje, si se trata de acercar la punta a la muestra, por más pequeño que sea el movimiento, siempre se chocará con la superficie. Si se tuviese el sistema de control, este extendería la punta del piezo eléctrico hasta que se aumente el voltaje de salida.

Posterior a la verificación de tunelaje inicial se realiza una prueba un poco más elaborada que acerca la punta hasta la posición donde se presente tunelaje y en ese punto se varía la tensión de Bias aplicando un voltaje sinusoidal de 1.000kHz y amplitud variable. En esta prueba se logra notar como la corriente de tunelaje sigue la forma sinusoidal de la tensión de bias y aumenta conforme se incrementa la amplitud de voltaje.

En esta prueba se presentó una condición interesante en la cual, al aumentar lentamente la tensión, luego de un punto (2 o 3V) la señal se vuelve inestable y con el tiempo se nota como se produce el equivalente a un choque punta-muestra. Esto sucedió en cada prueba que se realizó y en cada ocasión resultaba necesario alejar la punta de la muestra, lo que simboliza que en cada prueba la punta se veía extendida y por tanto la presencia del voltaje alterno en la muestra incentiva la difusión de átomos de tungsteno en la punta que se posicionan de tal forma que se minimice la distancia punta-muestra. Este método se ha especificado en artículos pero para voltajes mayores por lo que no se esperaba que sucediera a voltajes tan bajos.

Es de gran importancia notar que el sistema es sumamente sensible a las vibraciones y el simple hecho de hablar cerca del microscopio modifica la corriente de tunelaje o hasta puede hacer colisionar la punta con la muestra, por esta razón a futuro resultará necesario desarrollar un sistema de aislamiento vibracional más robusto.

Cabe notar que en esta sección no fue posible hacer métodos cuantitativos dado que en ocasión de tunelaje el valor de voltaje variaba debido a que no era posible mantener constante la distancia punta-muestra en cada medición desarrollada y por tanto el voltaje de salida resultaba estocástico.



### 4.1.3 Conclusiones

En esta sección se obtienen muy buenos resultados, si bien se encuentran fuentes de ruido a las frecuencias de trabajo, la intensidad de este no es tan grande como para generar mayores problemas. De esto se determina que el sistema al utilizarse ha de funcionar satisfactoriamente y cumplirá con los objetivos planteados en la etapa de diseño.

Si bien no se realizaron pruebas formales al sistema completo, si se desarrollaron pruebas al sistema de control y se determinó que el sistema funciona favorablemente como un controlador proporcional integral y por tanto al unirlo con los sistemas de la cabeza de tunelaje se espera que se obtengan buenos resultados.

A futuro se espera diseñar un sistema de aislamiento para el contacto de la punta para evitar que penetre ruido en este, también se puede disminuir el tiempo de integración del OP5 para aumentar la ganancia del sistema a frecuencias más altas, si debe tomarse en cuenta que al hacer esto, se aumenta la influencia del ruido de alta frecuencia por lo que debe tenerse cuidado en ese sentido.

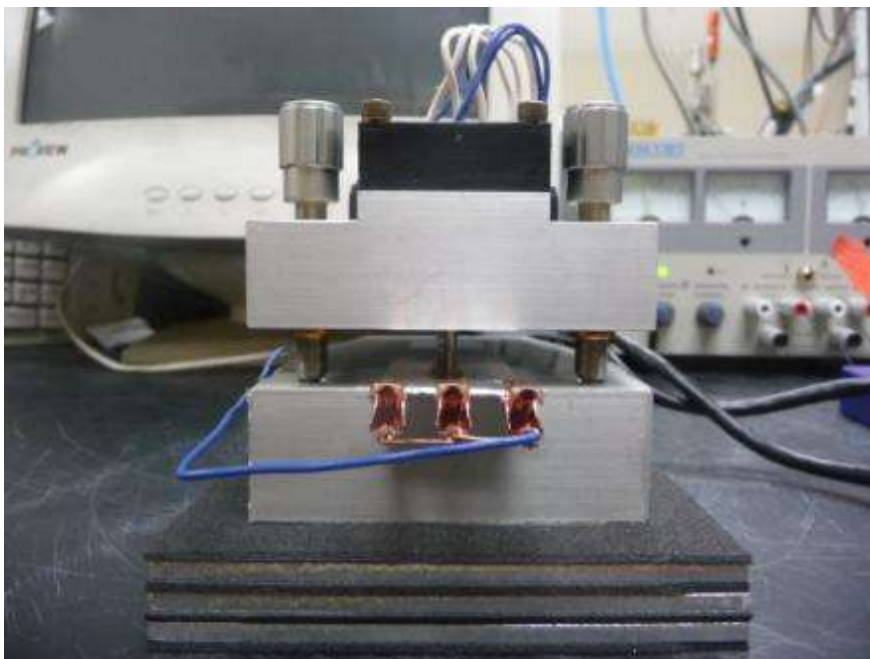
Fuera de estas mejoras es posible considerar la utilización de electrónica de alto voltaje a la salida del sistema para mejorar las posibilidades de ámbito de barrido y extensión en Z del piezoeléctrico, este cambio no debería generar mayor complicación esto si pensando que se tuviese una fuente de alto voltaje simétrica y de buena calidad. Se hace notar esto dado que inicialmente en las pruebas se utilizó una fuente no simétrica que era causante de un ruido bastante alto en el sistema de control.

## 4.2 Mecánica

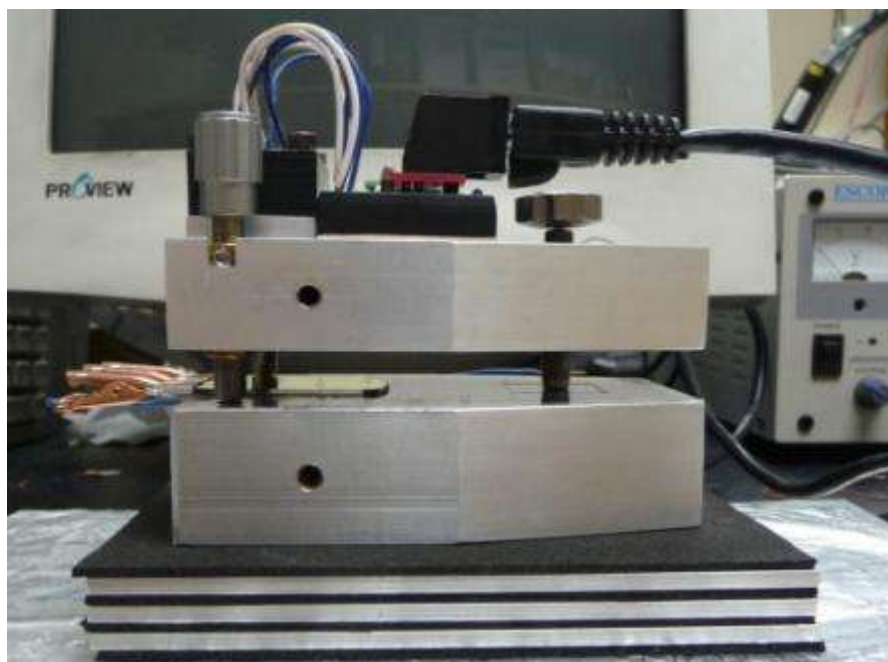
### 4.2.1 Sistema desarrollado

En este rubro, el principal desarrollo es la creación de la cabeza de barrido, esta sigue las especificaciones de la imagen 3.26 y se encuentra elaborada en aluminio. Se escoge este material dado que es fácilmente maquinado y su costo no es tan alto como en el acero inoxidable. El desarrollo de esta cabeza tomo varios meses pero el resultado final fue un sistema de buena calidad, útil para para los análisis preliminares con el microscopio.

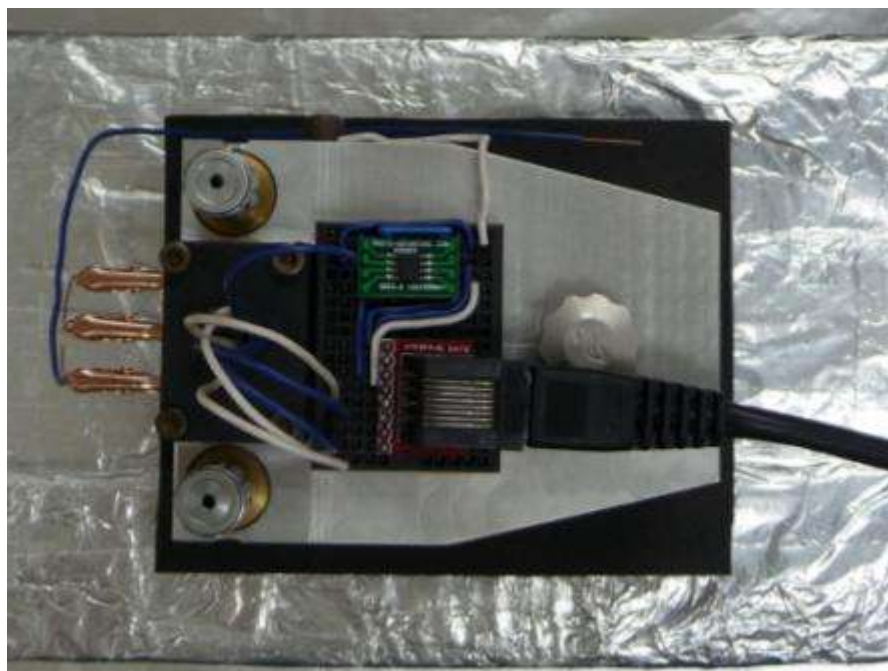
En las figuras 4.36 a 4.38 se presenta imágenes de las tres vistas principales de la cabeza de microscopía. En esta puede observarse también el sistema de aislamiento vibracional y también el amplificador de transimpedancia, el cable de alimentación y la muestra utilizada en el análisis de la sección anterior.



**Figura 4.36: Cabeza de microscopía, vista frontal**



**Figura 4.37: Cabeza de microscopía, vista lateral**



**Figura 4.38: Cabeza de microscopía, vista aérea**

#### **4.2.2 Conclusiones**

En general el sistema desarrollado funciona de la manera deseada, el movimiento de los tornillos de acercamiento grueso y fino es suave y fácilmente manejable de manera que no es necesario introducir vibraciones por el movimiento de tornillos mal engrasados, junto a esto, debido a que el sistema se realiza a partir de una lámina de una pulgada de aluminio las capas de la cabeza son muy estables mecánicamente y se nota que es un equipo muy robusto y capaz de soportar bien la vibración.

Para mejorar aún más las características del sistema de microscopía se usan bandas elásticas que unen las capas de la cabeza de microscopía, en las imágenes no pueden verse pero las bandas se posicionan entre los huecos de tornillo que se aprecian en la figura 4.37, existen 3 pares de huecos en la cabeza, dos a los lados y uno en la sección posterior utilizados para disminuir la vibración que se pueda producir a la hora de realizar el barrido.

## 4.3 Programación

### 4.3.1 Barrido superficial y transmisión de datos

El software desarrollado para el microcontrolador MSC1211Y5 sigue los lineamientos descritos en la sección 3.2 y se desarrolla de manera ordenada y estructurada.

Al realizar el depurado (debugger) del sistema se logra verificar el programa funciona de buena manera y se pasa por todas las etapas del mismo, de manera que el software realiza lo esperado por este.

En estas pruebas se logra correr el código línea por línea para verificar que el sistema entre y desarrolle las operaciones solicitadas para el análisis de los datos, al concluir que el sistema funciona de la manera deseada, se puede descargar el software al microcontrolador y volver a depurarlo para determinar posibles errores.

Si bien si resulta posible introducir el programa en el microcontrolador y es posible notar que se realizan ciertas secciones del código, el sistema no funciona debidamente y las operaciones realizadas son sumamente lentas.

Por ejemplo se hizo la prueba de correr el código siguiente:

```
while (1){P3 = !P3;}
```

Este código al compilarse realiza el toggle del puerto 3 en una sola línea y el análisis del while en otra. Tomando en cuenta que las instrucciones duran 4 ciclos de reloj, el sistema, en teoría debe ser capaz de realizar un toggle cada 8 ciclos de reloj, por lo que con un reloj de 11.0592MHz, similar al utilizado en el proyecto, se debe realizar 1.382400 millones de cambios por segundo.

Al verificar esta señal en un osciloscopio con un ancho de banda de 100MHz, se nota que si bien se presenta un cambio cíclico de los valores, este no se realiza a 1.4MHz sino que 22.4kHz, por tanto se encuentra que el sistema, funciona a una frecuencia a sumamente baja.

Se procede a compilar varios programas desarrollados por Texas Instruments para utilizar con el microcontrolador y el entorno de programación utilizado. Se obtienen dos resultados dependiendo de si el programa hace uso de las herramientas de conversión de datos e interrupciones o bien si no se utilizan.

Por ejemplo, en programas que modifican únicamente los puertos de digitales, el funcionamiento resulto adecuado, aún y cuando se presenta la baja frecuencia de funcionamiento.

En caso de que se utilicen interrupciones, el programa deja de funcionar y se queda pegado en la interrupción indefinidamente, esto aún y cuando el programa funciona correctamente en el depurador. Esto implica que los temporizadores no funcionan de la manera debida y por tanto varias funcionalidades del microcontrolador se ven limitadas.

Un problema similar se presenta cuando se utilizan programas que manejen los conversores de señales. En el caso de la utilización de conversores ADC, la conversión no logra darse debido a que los temporizadores no funcionan y si bien la conversión ADC es automática en el sentido que no hay que cargar ningún temporizador, la conversión no logra concretarse debido a que el sistema cuenta con un temporizador interno.

Al utilizar conversores DAC el problema es diferente dado que al utilizar el programa de prueba se espera obtener una onda sinusoidal a la salida pero lo que se obtiene es una onda truncada que no asemeja una onda sinusoidal.

De los periféricos del sistema, el único que se logra probar de satisfactoriamente es el puerto serial. Para este se realiza una prueba en que se envía una fila de datos (128 pixeles) de manera repetitiva. El formato de los pixeles en la fila siguen el formato de la sección 3.2.3 y el dato guardado en cada posición aumenta de forma lineal con el número de pixel. De esta forma se espera que el pixel 0 sea de la forma X0000Y0000Z0000, luego el 1 será X0001Y0001Z0001 y así sucesivamente. En la figura 4.39 se presenta los resultados de la transmisión serial. En esta imagen se encuentra que el sistema transmite los datos de la forma deseada y con un porcentaje de error muy bajo dado que de todos los datos transmitidos no se presenta ningún error de transmisión.

Fuera de los errores meramente programáticos, también se presentó un problema de índole física dado que inicialmente el reloj externo no funcionaba y fue necesario variar la capacitancia del reloj en un ámbito amplio de valores para lograr que este funcionara y fuese posible programar al microcontrolador. Si bien luego de un tiempo y con el juego de capacitancias correcto, fue posible programar el sistema, la mayoría de las veces dado que aún se presentan momentos donde el sistema deja de funcionar, sin previo aviso. Esta situación deja la sospecha de que el reloj externo es la razón del porque el microcontrolador funciona lentamente. Para solucionar esto se intentó cambiando el cristal o hasta utilizando otros dispositivos de temporización, relojes TTL, pero el sistema continua siendo inestable, por lo que este error continua sin ser solucionado.





Debido a los problemas obtenidos con este microcontrolador y la imposibilidad de hacer funcionar este sistema resultó imposible completar la sección de programación dado que si bien se hicieron las pruebas pertinentes y se depuro el código para lograr que este funcionase de correctamente, el microcontrolador no logró trabajar como era esperado.

Por esta razón se adquirió otro microcontrolador para migrar el programa a este nuevo sistema, desgraciadamente este microcontrolador no es del tipo 8051 y por tanto el cambio no es fácil de realizar y no fue posible desarrollarlo a tiempo, por lo que no fue posible hacer que la unidad de barrido funcione de buena manera debido a errores de hardware.

Para concluir que el microcontrolador no funciona de manera adecuada se consultó con varios profesores de la escuela y se solicitó ayuda a la compañía constructora del microcontrolador (Texas Instruments) pero dado que el microcontrolador no es de las marcas usualmente trabajadas en la escuela (Atmel, Microchip, etc.) no me fue posible obtener ayuda docente y por su parte Texas Instruments discontinuó la atención al producto en diciembre del 2008 por lo que por esa parte tampoco fue posible encontrar ayuda y por esta razón se prefirió cambiar de microcontrolador.

El nuevo microcontrolador escogido para el segundo intento es el AD $\mu$ C7026 que cuenta con una tarjeta de desarrollo propia con todos los dispositivos necesarios para el funcionamiento ya instalados y por tanto no es necesario adquirir relojes externos ni mucho menos cablear la salida RS232 del sistema.

Se espera que este sistema funcione de manera más efectiva y que la programación no presente problemas pero debido a que este sistema es de una tecnología diferente (ARM

en vez de 8051) el cambio en la programación no es simple y es necesario aprender a manejar gran cantidad de registros y funciones propias del nuevo microcontrolador y si bien se intentó modificar el código y aprender las nuevas especificaciones, debido al corto tiempo dispuesto para el desarrollo del proyecto no fue posible lograr realizar completamente el cambio sino que se finalizó en etapas preliminares.

En resumen si bien se desarrolló un software funcional no fue posible pasarlo a la etapa física y por tanto no fue posible utilizar el sistema para realizar el barrido, con alrededor de dos o tres meses más de trabajo podría modificarse el código para que funcionase con el AD $\mu$ C7026 por lo que a futuro esta es una meta clara para el proyecto, si se presentara más adelante como proyecto de licenciatura u otro.

#### **4.3.2 Interfaz Gráfica**

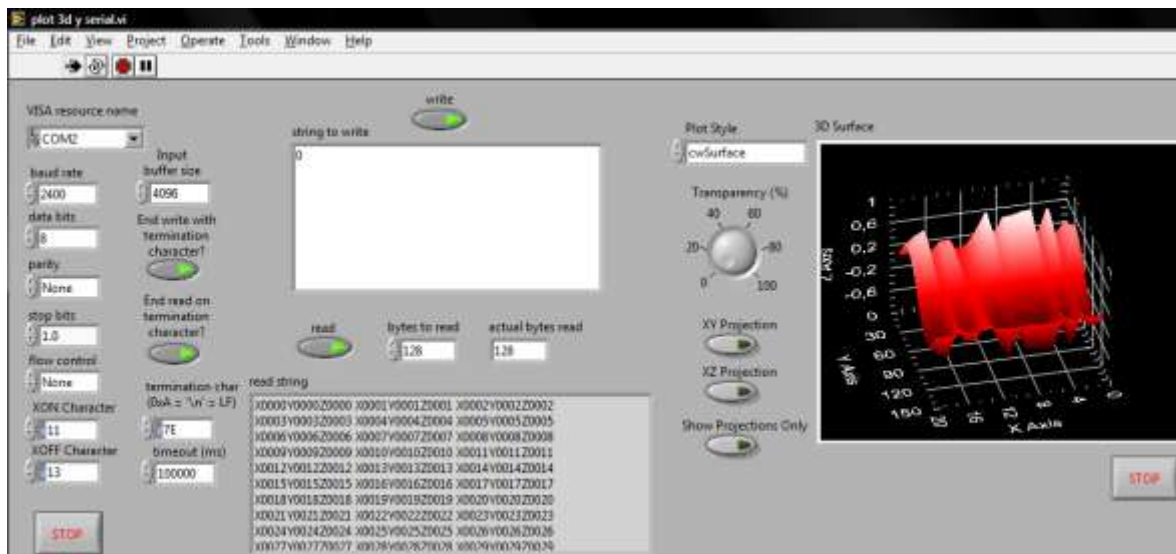
En el rubro de interfaz gráfica se utiliza el programa LABVIEW de National Instruments y se desarrolla, con ayuda de los tutoriales un programa que recibe y envía datos de forma serial, este programa es el utilizado en la sección 4.3. El software recibe la cantidad de datos que el usuario desea y los almacena en un buffer que luego puede ser guardado en un archivo de texto o editado para ajustarse a la forma deseada.

Esto último (salvar y modificar los datos) no fue implementado dado que al cambiar el microcontrolador usualmente resulta útil realizar algunas modificaciones en cuanto a formato y demás por lo que haber avanzado en esta sección podría resultar inútil a la larga.

Por tanto el software recibe datos y los almacena en el buffer, si el usuario lo desea puede modificarlos y arreglar el formato para que siga el utilizado por el graficador tridimensional de LABVIEW.

Por tanto, junto al programa para transmisión RS232 se desarrolla un código que recibe una matriz bidimensional y la gráfica en una imagen tridimensional.

La pantalla principal del software desarrollado se presenta en la figura 4.40, la sección de transmisión serial a la izquierda y el graficador 3D a la derecha.



**Figura 4.40: Interfaz gráfica, recepción RS232 y graficado tridimensional**

En esta sección los resultados son positivos y se considera que teniendo el sistema de barrido funcionando, el desarrollo final de la interfaz gráfica debe poder realizarse de manera expedita, dado que lo único que hace falta es una unión entre los dos módulos que consiste en un conversor de los datos de entrada a una matriz bidimensional.

## **CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Panorama futuro**

A futuro se espera emigrar a la nueva plataforma (AD $\mu$ C7026) y poder así terminar de implementar el sistema de microscopía y realizar análisis superficiales. Se espera realizar varias pruebas y determinar los factores débiles del diseño para luego poder mejorarlo y desarrollar un sistema con mejores prestaciones que se desarrollara en conjunto con diferentes mejoras que convertirán al sistema en uno de microscopía más funcional.

También resultará primordial mejorar los sistemas de inmunización al ruido, tanto mecánico como electromagnético, esto es necesario dado que al aumentar los voltajes de trabajo, el ruido inherente en el sistema aumentará también y por tanto se debe tratar de disminuirlo aún más. En este sentido también resultará útil verificar las propiedades de la cabeza de microscopía y ver si resulta posible mejorar su diseño e implementarlo en acero inoxidable que resulta mucho mejor en estos casos. En cuanto a ruido electromagnético, a futuro se utilizará un cable recubierto, para el contacto que lleva la corriente de tunelaje para limitar la influencia del ruido provocado por las tensiones aplicadas a los contactos del piezoeléctrico.

Teniendo un sistema con mayor inmunidad contra el ruido, resultará posible a futuro, implementar el circuito completo de la etapa de diseño, esto le brindará al sistema de microscopía grandes prestaciones como controlar el ámbito de muestreo, seleccionar el modo de barrido o hasta el modo de amplificación de corriente, características que significan un gran cambio para el sistema y abren posibilidades para la investigación.

## 5.2 Logros Generales

El proyecto si bien no fue exitoso al 100% se presentaron bastantes logros que lo convierten en un éxito a nivel de proyecto, en específico fue posible trabajar con materiales piezoeléctricos y lograr verlos funcionar; también fue posible diseñar un controlador PI e implementarlo. Se diseñó un amplificador de transimpedancia con una ganancia del orden de  $10^8$  y se logró ver como este sistema era sensible a corrientes de 25pA o menores, si se hubiese contado con una fuente de voltaje menor, también se diseñó un método de minimización de ruido electromagnético (Jaula de Faraday) y mecánico (sistema de aislamiento vibracional) con buenas prestaciones para el diseño actual.

Se realizan pruebas a cada sección del diseño electrónico y se verifica que todo el sistema funciona satisfactoriamente y que si bien aparecen fuentes de ruido, a la frecuencia de operación este ruido no es significativo y por tanto se le da el visto bueno al sistema.

En el rubro mecánico se desarrolla un sistema de barrido en aluminio que es bastante rígido y logra funcionar de manera adecuada, logrando acercar la punta hasta el punto que se presente corriente de tunelaje, el fin fundamental del microscopio de efecto túnel. Junto a esto se desarrolla el método de aislamiento vibracional que consiste en láminas de aluminio y espuma suave intercaladas para que cualquier ruido proveniente del exterior no se transmita a la punta de microscopio de efecto túnel.

Por último, en cuanto a programación se desarrolló un programa funcional con una forma estructurada y simple que hace uso de interrupciones, temporizadores, transmisiones RS232 y convertidores ADC/DAC, este programa no es posible hacerlo funcionar

totalmente pero si es posible realizar transmisiones RS232 para verificar la forma de los datos y la posibilidad del sistema para comunicarse con el mundo exterior. También se diseñó un sistema de transmisión y recepción de datos RS232 en la PC mediante el entorno de programación LABVIEW, a los datos recibidos se espera modificarlos e introducirlos al módulo de graficado en el cual se toman los datos recibidos y se hace una gráfica tridimensional a partir de estos.

### **5.3 Recomendaciones**

A futuro al desarrollar un proyecto resultará útil preguntarse cuál es el punto más crítico del desarrollo y comenzarlo previo a los demás para determinar qué tanto influye en el desarrollo del sistema, realizar este análisis es bastante complicado dado que en ocasiones se puede considerar una sección como más simple que otra y a la hora de implementar el sistema se producen atrasos debido a que se subestiman ciertas etapas.

Se recomienda también, buscar varias alternativas y optar por la más robusta de ellas aún y cuando simbolice más trabajo, en el caso de este trabajo, utilizar módulos aislados de conversión de datos resulta más complicado pero hubiese hecho más fácil intercambiar microcontroladores cuando uno no funcionara de la manera adecuada. Por tanto en ocasiones tratar de ahorrar trabajo y utilizar un sistema que se considera bueno puede estar contraindicado si se tiene un sistema más robusto que pueda hacer el trabajo.

Por último, se recomienda realizar pruebas a cada etapa del para evitar que se presenten problemas en etapas que se consideren elementales o bien que se presenten fallos y que se pasen por alto por no realizar un pruebas adecuadas.

## 5.4 Conclusiones

El presente proyecto ha logrado unir como ningún otro muchas áreas de la ingeniería eléctrica y hasta mecánica en ocasiones, con este proyecto se han desarrollado diseños electrónicos de precisión, métodos de disminución de ruido, sistemas de control realimentado, diseños mecánicos, programación en C y entornos de programación gráfica de alto nivel y hasta se ha tenido que investigar acerca del formalismo cuántico de efecto túnel o bien hasta aprender de nuevos materiales y dimensionar estos para lograr las mejores prestaciones posibles para el sistema.

Junto a esto se practican habilidades no propias de la profesión como el de adquisición de materiales y trato con compañías internacionales, dado que el sistema de microscopía se basa en dispositivos de electrónica de alta precisión que no pueden ser adquiridos en el país, o bien materiales especializados y de costo elevado (piezoeléctrico), que deben ser tratados con suma delicadeza y por tanto representan un trasiego complicado al país, este proceso de adquisición se extendió por cuatro meses y consistió en la interacción con varios proveedores internacionales y representantes locales.

Como se dijo anteriormente, este proyecto encapsula de una manera u otra gran parte del ámbito de trabajo de un ingeniero eléctrico y si bien no logró funcionar de la mejor manera el proceso de diseño e implementación significan un gran avance en el desarrollo del proyecto y sin lugar a dudas si no se hubiesen presentado problemas con el microcontrolador se tiene la fe de que hubiese sido posible obtener barridos de materiales varios y lograr completar por tanto el fin del microscopio de efecto túnel.

## BIBLIOGRAFÍA

### Artículos de revistas:

1. M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler. "Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface", *Science*, Vol. 262, pp. 218-220, 1993.
2. Binnig G, Rohrer H., Gerber Ch., and Weibel E., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 40, Issue 2, pp. 178-180 (1982)
3. Bardeen, J.: Tunnelling from a many-particle point of view, *Physical Review Letters* 6 (2), 1961, p. 57-59
4. Drake B, Sonnenfeld R, Schneir J, Hansma PK: "Scanning tunneling microscopy of processes at liquid-solid interfaces", *Surf. Sci.* 181, 92-97 (1987)
5. Pohl DW: "Some Design Criteria in Scanning Tunneling Microscopy", *IBM J. Res. Develop.* 30 (4), 417-427 (1986)
6. Binnig G, Smith DPE: "Single-Tube Three-Dimensional Scanner for Scanning Tunneling Microscopy", *Rev. Sci. Instrum.* 57, 1688-1689 (1986)
7. Kuk Y, Silverman PV "Scanning tunneling microscopy instrumentation", *Rev. Sci. Instrum.* 60, 165-180 (1989)
8. Park SI, Quate CF: "Theories of the feedback and vibration isolation systems for the scanning tunneling microscope", *Rev. Sci. Instrum.* 58, 2004-2009 (1987)
9. Park SI, Quate CF: "Scanning tunneling microscope", *Rev. Sci. Instrum.* 58 (11), 2010-2017 (1987)



10. Chen YP, Cox AJ, Hagmann MJ and Smith HDA, "Electrometer Preamplifier for Scanning Tunneling Microscopy," Rev. Sci. Instrum. 67, 2652-2653 (1996)

Libros:

11. Chen, C.J. "Introduction to Scanning Tunneling Microscopy", 2da edición, Oxford Science Publications, England, 2008.

Páginas web:

12. Michael Schmid, "The Scanning Tunneling Microscope",  
[http://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/stm\\_gallery/stm\\_schematic](http://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/stm_gallery/stm_schematic)
13. Anónimo, "Seeing Atoms",  
[http://www.nisenet.org/publicbeta/articles/seeing\\_atoms/index.html](http://www.nisenet.org/publicbeta/articles/seeing_atoms/index.html)
14. Piezoelectricidad "Piezoceramics tutorial",  
<http://www.morganelectroceramics.com/resources/piezo-ceramic-tutorials/>
15. Jürgen Müller, "STM project - an Amateur Scanning Tunneling Microscope",  
<http://e-basteln.de/>
16. Anónimo, "Lead zirconate titanate",  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Lead\\_zirconate\\_titanate](http://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate)
17. Anónimo, "Operational amplifier applications",  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier\\_applications](http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier_applications)

## APÉNDICES

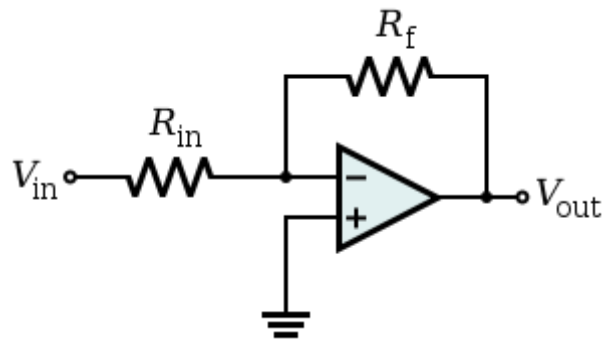
### A.1 Amplificadores operacionales

En el proyecto se utilizan amplificadores operacionales para amplificar los voltajes de barrido y también para desarrollar el sistema de control, esto se hace utilizando las configuraciones básicas de los amplificadores operacionales y uniéndolas para obtener el resultado óptimo. Se utilizan 8 configuraciones y estas se explicarán a continuación para que se tenga un mejor concepto al verificar la sección de diseño.

#### A.1.1 Amplificador inversor

Este amplificador toma un voltaje y lo amplifica por el negativo de la relación de las resistencias, en esta, se pueden obtener aumentar o disminuir el voltaje de la salida con respecto a la entrada si esto fuese necesario, se tendrá:

$$V_{OUT} = -\frac{R_F}{R_I} V_{IN} \quad (\text{A.1-1})$$



**Figura A.1.1: Amplificador inversor**

En este caso si  $R_f=R_{in}$  se tiene

$$V_{OUT} = -V_{IN} \quad (\text{A.1-2})$$

### A.1.2 Amplificador No Inversor

En este amplificador se busca obtener una amplificación en la cual el sistema mantenga el signo del voltaje inicial, en esta caso no es posible obtener un voltaje menor al inicial, una característica que debe tomarse en cuenta.

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{IN} \quad (2.7-3)$$

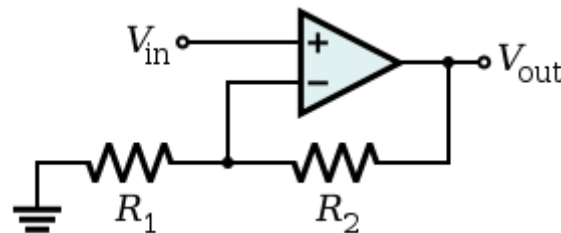


Figura A.1.2: Amplificador No Inversor

### A.1.3 Amplificador Diferencial

Se hace una combinación de los amplificadores anteriores y es posible obtener una resta entre los voltajes de entrada.

$$V_{OUT} = \frac{(R_f + R_1)R_g}{(R_g + R_2)R_1} V_2 - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (A.1-4)$$

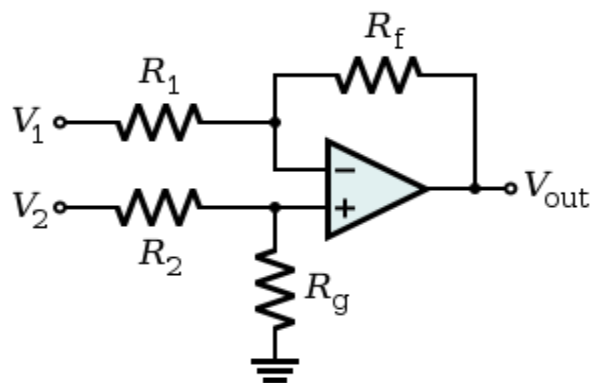


Figura A.1.3: Amplificador Diferencial

En este caso si  $R_1=R_2$  y  $R_f=R_g$  se tendrá la relación:

$$V_{OUT} = \frac{R_g}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (A.1-5)$$

### A.1.4 Seguidor de Voltaje

Este amplificador no realiza ningún cambio entre el voltaje de entrada y salida, se utiliza para desacoplar impedancias en circuitos o mejorar el margen de ruido de una señal.

$$V_{OUT} = V_{IN} \quad (\text{A.1-6})$$

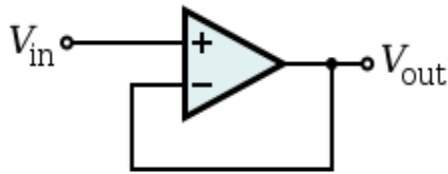


Figura A.1.4: Seguidor de Voltaje

### A.1.5 Amplificador Sumador

Se utiliza un amplificador inversor pero en este caso se ponen más de una entrada y como el amplificador es lineal, se obtiene una superposición de las entradas en la salida, obteniendo una suma de voltajes.

$$V_{OUT} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) \quad (\text{A.1-7})$$

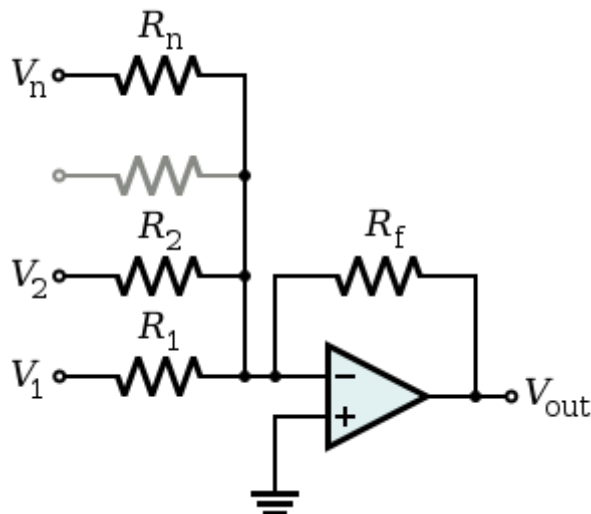


Figura A.1.5: Amplificador Sumador

Si en este caso  $R_1=R_2=\dots=R_n$

$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R_1}(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (\text{A.1-8})$$

### A.1.6 Amplificador Integrador

Este amplificador realiza una integración del voltaje de entrada algo muy útil al desarrollar el controlador integrador del sistema.

$$V_{OUT} = -\int_0^t \frac{V_{IN}}{RC} dt + V_{inicial} \quad (\text{A.1-9})$$

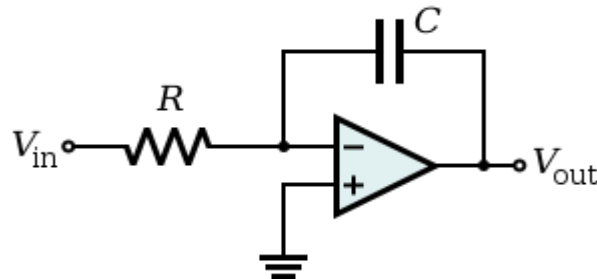


Figura A.1.6: Amplificador Integrador

### A.1.7 Amplificador Derivador

Este amplificador realiza una derivación del voltaje de entrada algo muy útil al desarrollar el controlador derivador del sistema, si fuese a utilizarse en el proyecto

$$V_{OUT} = -RC \frac{dv_{in}}{dt} \quad (\text{A.1-10})$$

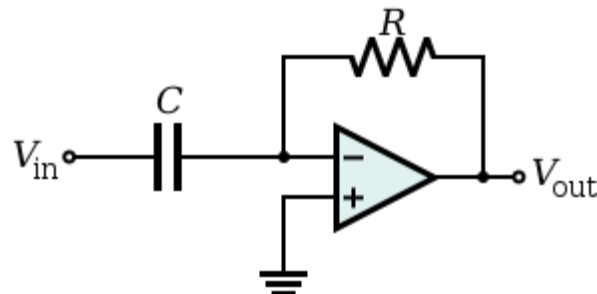


Figura A.1.7: Amplificador Derivador

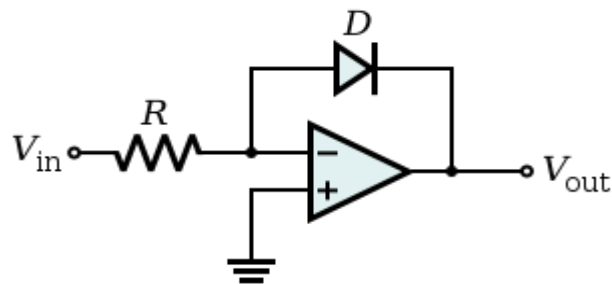
### A.1.8 Amplificador Logarítmico

El último tipo de amplificación utilizada es la logarítmica, esta es de utilidad en el proyecto dado que la corriente de efecto túnel tiene un comportamiento exponencial, por lo que utilizando un amplificador logarítmico es posible obtener un voltaje de salida que depende linealmente con la separación punta muestra. La relación de este amplificador es de la forma:

$$V_{OUT} = -V_T \ln \frac{V_{IN}}{I_S R} \quad (\text{A.1-11})$$

Con 
$$V_T = \frac{k_B T}{e} \quad (\text{A.1-12})$$

Además  $I_x$  es la corriente de saturación del diodo utilizado.



**Figura A.1.8: Amplificador Logarítmico**

Estos son las ocho configuraciones que se utilizarán en el diseño del microscopio, teniendo estas en mente será más simple comprender el funcionamiento del sistema completo.