



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**

---

**Instituto de Ciencias Básicas a Ingeniería**

**Área Académica de Electrónica y Telecomunicaciones**

**Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Automatización de un medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas en función de la temperatura.**

**TESIS**

**que para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones presentan:**

**P.D.L.I.E.T. Corona Cortés Miguel Ángel**

**P.D.L.I.E.T. Cruz Domínguez José Pablo**

**Asesor: Dr. Eduardo Morales Sánchez**

**Pachuca de Soto, Hidalgo 2006**



**CIAII**

**Este trabajo de investigación y desarrollo fue financiado con recursos del proyecto PROMEP /103.5/04/2760 y se realizó en el Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial (CIAII) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.**

# AGRADECIMIENTOS

*A Dios.*

Quien ha estado conmigo en todo momento aún en las situaciones más difíciles y me ha ayudado a salir adelante.

*A mis queridos padres.*

Quienes me han cuidado y brindado su apoyo durante todo este tiempo. A mi Mamá a quien admiro por mantener esa lucha constante en la vida de la cual siempre ha salido adelante. A mi Papá por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. Por ello les doy las gracias.

*A mis hermanos.*

Por compartir momentos que nunca olvidaré. A mi hermana Citlalli que aunque es la más pequeña de la familia es quien le da alegría a la familia. A mi hermana Claudia con quien me divierto en las fiestas y en quien confío. A mi hermano Pablo que lo quiero mucho porque ha estado conmigo y me ha ayudado. Gracias los quiero mucho.

*A mis abuelos.*

Que en sus palabras llevan la sabiduría que han adquirido a través del tiempo y de la experiencia. También les doy las gracias por querer que yo salga adelante y porque sé que mi abuelita estará contenta de que yo me titule. Los quiero mucho

*A mis amigos.*

A mi amigo Rafa por enseñarme el valor de la amistad. A mi amigo Iván por apoyarme siempre. A Gerardo por brindarme su amistad. Más sin embargo a todos ellos no los considero mis amigos sino mis hermanos. Porque quien dice que tiene amigos es un hombre rico y yo soy un hombre muy rico.

*A Daniela.*

Como siempre. Por estar conmigo en todo momento. Y por el cariño especial que le tengo.

*Al Doctor Eduardo Morales Sánchez.*

Por brindarnos la oportunidad de realizar nuestro trabajo de tesis. También por brindarnos apoyo día con día. Por la confianza y paciencia que depositó en nosotros, pero sobre todo por su amistad.

JOSÉ PABLO CRUZ DOMÍNGUEZ

# AGRADECIMIENTOS

Primeramente, gracias a Dios por poner en mi camino a tantas personas, quienes han contribuido de forma significativa, directa o indirectamente a este trabajo y a mi vida, de las cuales me he podido apoyar y aprender de forma innegable.

Un trabajo como el presentado a continuación, siempre es el resultado sinérgico de esfuerzos individuales, colectivos e institucionales. Una página no alcanzaría para citar a todos los que directa o indirectamente contribuyeron para obtener los resultados propuestos en el tiempo deseado, de ahí que quiero agradecer sinceramente:

A mi Asesor de Tesis, Dr. Eduardo Morales Sánchez por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, sencillez, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

Al Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial, por proporcionar la infraestructura necesaria para la realización de este proyecto, así como también los recursos necesarios.

A mis Padres y Hermanas quienes me infundieron la ética y el rigor que guían mi transitar por la vida, sabiendo de antemano que jamás existirá una forma de agradecer una vida de lucha, esfuerzos, y sacrificios; sólo deseo que sepan que mi logro es suyo, que todo mi esfuerzo es inspirado en las palabras de aliento escuchadas en los momentos difíciles y que representan para mí el único ideal de respeto y admiración que espero lograr algún día. Y a toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional, haciéndome saber que en ellos podré encontrar siempre un sustento y un camino.

MIGUEL ÁNGEL CORONA CORTÉS

---

# Resumen

La resistividad es una propiedad eléctrica de los materiales, la cual es utilizada para clasificar a los materiales en: conductores, semiconductores y aislantes.

En este trabajo se realizó el diseño, la construcción y la automatización de un medidor de resistividad por la técnica de cuatro puntas colinéales en función de la temperatura para la medición de resistividad de películas delgadas y materiales en general en función de la temperatura. El medidor de resistividad diseñado y construido consta principalmente de un multímetro, un nanovoltmetro, una fuente de voltaje y un controlador de temperatura. Se utilizó la comunicación GPIB 488 y la comunicación serial RS-232 para la automatización del sistema construido. Se aprovechó la versatilidad y facilidad de LabView para manejar los protocolos de comunicación GPIB y RS-232.

Además de la aplicación dada, este dispositivo puede ser utilizado para medir con exactitud resistencia óhmica de materiales como dispositivos SMD y dispositivos estándar. También este dispositivo puede medir la resistividad de materiales iónicos utilizados para celdas de combustible.

El medidor de resistividad construido y automatizado fue probado en la medición de resistividad de una película delgada de GeSbTe en su composición 124, obteniéndose la curva típica de resistividad para este tipo de material.

# Índice General

	<b>Página</b>
<b>Resumen</b> .....	1
<b>Índice General</b> .....	2
<b>Índice de Tablas</b> .....	5
<b>Índice de Figuras</b> .....	6
<b>I. Introducción</b> .....	<b>8</b>
<b>II. Antecedentes</b> .....	10
2.1. Electricidad .....	10
2.1.1. Introducción .....	10
2.1.2. Resistencia .....	11
2.1.3. Propiedades eléctricas.....	14
2.1.4. Resistividad .....	15
2.1.5. Condiciones de medición de resistividad .....	16
2.2. Comunicación GPIB .....	17
2.2.1. Introducción del GPIB .....	17
2.2.2. Descripción de GPIB .....	17
2.2.3. Estructura de un sistema GPIB .....	18
2.2.4. Características eléctricas del GPIB .....	18
2.2.5. Descripción de los pines de salida del GPIB .....	19
2.2.6. Hardware disponible para sistemas GPIB .....	20
2.3. Comunicación serie: Protocolo RS-232 .....	21
2.3.1. Introducción .....	21
2.3.2. Características de la comunicación serie .....	23
2.3.3. Características eléctricas. Conectores .....	26
2.4. Lenguaje de programación LabView 7.1 .....	30
2.4.1. Introducción .....	30
2.4.2. Panel Frontal .....	31

2.4.3. Diagrama de bloques .....	31
2.4.4. Paletas .....	33
2.4.4.1. Paletas de trabajo .....	33
2.4.4.2. Paleta de controles .....	34
2.4.4.3. Paleta de funciones .....	36
<b>III. Objetivos .....</b>	<b>38</b>
3.1. Objetivo general .....	38
3.2. Objetivos específicos .....	38
<b>IV. Justificación y alcance del trabajo .....</b>	<b>39</b>
4.1. Justificación del trabajo de tesis .....	39
4.2. Alcances .....	40
<b>V. Hipótesis .....</b>	<b>41</b>
<b>VI. Metodología .....</b>	<b>42</b>
6.1. Metodología .....	42
6.2. Métodos .....	43
6.2.1. Técnica de 4 puntas para medición de resistividad. ....	43
<b>VII. Identificación de necesidades y especificaciones .....</b>	<b>44</b>
7.1. Medición de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura .....	44
7.2. Especificaciones de un medidor de resistividad de 4 puntas colinéales en función de la temperatura. ....	45



---

<b>VIII. Diseño y construcción del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura</b> .....	49
8.1. Diagrama de bloques .....	49
8.2. Descripción del diagrama a bloques .....	51
8.3. Implementación eléctrica de cada bloque propuesto .....	53
<b>IX. Automatización del medidor de resistividad.</b> .....	
	64
9.1. Introducción .....	64
9.2. Desarrollo de la programación .....	65
9.3. Programa Medidor de Resistividad (unión de los programas anteriores) .....	74
<b>X. Prueba del medidor de resistividad</b> .....	79
10.1. Introducción .....	79
10.2. Arreglo del medidor de resistividad utilizado para las pruebas.....	79
10.2.1. Prueba de resistividad a una muestra de GeSbTe sin celda protectora. .....	80
10.2.2. Prueba de resistividad a una muestra de GeSbTe con celda protectora. .....	82
<b>XI. Conclusión</b> .....	85
<b>XII. Referencias y Bibliografía</b> .....	86
<b>Anexos A: Programación</b> .....	88
<b>Anexos B: Especificaciones Técnicas de los Instrumentos</b> .....	92

## Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción pines GPIB. ....	20
Tabla 2. Señales RS-232 C .....	28
Tabla 3. Asignación de los pines de los conectores DB9 y DB25 .....	29

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de la medición de resistividad por 4 puntas colinéales ..	16
Figura 2. Ejemplo de configuración de un sistema GPIB .....	18
Figura 3. Cable y conectores GPIB .....	19
Figura 4. Tarjeta PCI-GPIB.....	21
Figura 5. Cable de conexión RS-232 .....	22
Figura 6. Panel Frontal de un programa en LabView .....	32
Figura 7. Diagrama de bloques de un programa en LabView .....	32
Figura 8. Paleta de herramientas del programa LabView .....	33
Figura 9. Paleta de controles .....	35
Figura 10. Indicadores gráficos del programa LabView. ....	36
Figura 11. Paleta de funciones del programa LabView. ....	36
Figura 12. Diagrama esquemático de la medición de resistividad por 4 puntas colinéales. .....	43
Figura 13. Diagrama de medición de resistividad por 4 puntas .....	44
Figura 14. Diagrama de flujo de una medición de conductividad de 4 puntas colinéales...	46
Figura 15. Diagrama a bloques propuesto para el diseño del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura.....	51
Figura 16. Arreglo de 4 puntas con base metálica.....	54
Figura 17. Arreglos de cuatro puntas.....	54
Figura 18. Celda protectora para medición de resistividad.....	55
Figura 19. Fuente de Voltaje Agilent HP 3644A .....	57
Figura 20. Multímetro digital Agilent Modelo 34401A .....	58
Figura 21. NanoVolt/Micro Ohm Meter Agilent.....	59
Figura 22. Controlador Programable de temperatura Watlow .....	60
Figura 23. Diagrama de conexión entre el controlador de temperatura y el relevador de estado sólido. ....	61
Figura 24. Cable de conexión GPIB .....	62
Figura 25. Conexiones entre los instrumentos .....	62
Figura 26. Medidor de resistividad en función de la temperatura .....	63

Figura 27. Diagrama de flujo de medición de corriente .....	65
Figura 28. Programa desarrollado para Medición de corriente .....	66
Figura 29. Diagrama de flujo de Control de corriente. ....	67
Figura 30. Diagrama a bloques de Control de corriente .....	68
Figura 31. Diagrama de flujo de Medición de voltaje .....	69
Figura 32. Diagrama a bloques de Medición de voltaje. ....	69
Figura 33. Diagrama de flujo de Medición de temperatura. ....	70
Figura 34. Diagrama a bloques de Medición de Temperatura .....	71
Figura 35. Diagrama de flujo Fórmula de Resistividad .....	71
Figura 36. Diagrama a bloques Fórmula de Resistividad. ....	72
Figura 37. Diagrama de flujo Fórmula Promedio. ....	72
Figura 38. Diagrama a bloques Fórmula Promedio .....	73
Figura 39. Diagrama de flujo de Programación .....	73
Figura 40. Diagrama a bloques Programación de la temperatura .....	73
Figura 41. Diagrama de flujo Fórmula de Resistividad. ....	74
Figura 42. Diagrama a bloques Medidor de Resistividad (primer trama) .....	75
Figura 43. Diagrama a bloques Medidor de Resistividad (segunda trama).....	76
Figura 44. Panel Frontal al hacer la medición de Resistividad. ....	78
Figura 45. Arreglo total del medidor de resistividad construido con una celda protectora .....	79
Figura 46. Programa utilizado para realizar la medición de resistividad por PC. ....	80
Figura 47. Arreglo utilizado para la medición de resistividad sin celda protectora .....	81
Figura 48. Gráfica de una medición de resistividad contra temperatura de una película delgada de GeSbTe sin utilizar la celda de protección construída .....	81
Figura 49. Arreglo utilizado para la medición de resistividad con celda protectora .....	82
Figura 50. Gráfica de una medición de resistividad contra temperatura de una película delgada de GeSbTe utilizando la celda de protección construída .....	83
Figura 51. Comparación de la medición de resistividad contra temperatura con y sin celda protectora construída. ....	84

## I. Introducción

La medición de resistividad (propiedad eléctrica de un material) nos proporciona la información necesaria para poder clasificar a los materiales como: conductores, semiconductores y aislantes [1].

Existen dos técnicas para medir la resistividad: técnica por 2 puntas y por 4 puntas. La técnica de 2 puntas se realiza por medio de 2 contactos planares para medir la resistencia. Sin embargo la resistencia medida por dos puntas tiene una contribución extra debido a los contactos en la interfase electrodo-material. Esta contribución de la interfase se debe principalmente al efecto doble capa. Cuando existe esa contribución en la interfase de los contactos es recomendable medir por la técnica de 4 puntas, ya que esta técnica evita los efectos de los contactos midiendo exclusivamente la resistencia del material. Este método es empleado en la tecnología de circuitos integrados y en dispositivos semiconductores.

El método de medición de resistividad por 4 puntas consiste en colocar 4 electrodos colinéales sobre la muestra, entonces por los electrodos laterales se circula una corriente constante  $I$  y en los electrodos internos se inducirá un voltaje  $V$ . La resistividad se calcula aplicando una fórmula especial la cual toma en cuenta el  $V$  y la  $I$  medidos. Cuando se realiza investigación para conocer la dependencia de la resistividad en función de la temperatura se requiere que la medición de resistividad se haga en función de la temperatura. Y además, como la medición puede durar desde unos minutos hasta unas horas es muy conveniente que la medición de resistividad en función de la temperatura se haga automáticamente a través de una computadora y un programa especializado donde se introduzcan los datos de inicio y posteriormente entregue una gráfica de temperatura vs resistividad y un archivo con los datos correspondientes.

Por lo tanto el presente trabajo consiste en construir y automatizar un medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas en función de la temperatura.

Cabe mencionar que existen medidores de resistividad comerciales pero estos no incluyen la etapa de control de temperatura, ni la automatización, por medio de PC, por lo que este trabajo es de gran importancia en la investigación de propiedades eléctricas de materiales inorgánicos y películas delgadas al proporcionar al investigador un medidor de resistividad totalmente automatizado en función de la temperatura.

## II. Antecedentes

### 2.1. Electricidad

#### 2.1.1. Introducción

Las primeras noticias asociadas con fenómenos eléctricos provienen de la época griega. Thales de Mileto (640-546 AC) observó que el ámbar al frotarlo con tejido era capaz de atraer objetos ligeros. De hecho, la palabra electricidad proviene de "elektrón" que significa ámbar en griego. Aristóteles cita la descarga eléctrica del pez torpedo, y los antiguos indios conocían que ciertos cristales calentados eran capaces de atraer a cenizas calientes (piroelectricidad) [2].

Los primeros intentos de sistematización aparecen en el siglo XVI con la obra "De Magnete" de W. Gilbert donde introduce el término electricidad y encuentra que también la adquieren por frotamiento el cristal de roca y algunas gemas.

En el siglo XVIII son varios los hallazgos. Stephen Gray descubrió que la electrización podía transmitirse, con lo que empieza la electrización por contacto y por inducción; también fue el primero en clasificar los materiales en aislantes y conductores. Du Fay habló de dos tipos de electricidad, la vítrea adquirida por el vidrio, la lana y las piedras preciosas y la resinosa adquirida por el papel, la goma o el hilo, y estableció la ley empírica de que electricidades del mismo tipo se repelen y de distinto se atraen.

En 1752 Benjamín Franklin realizó su famoso experimento de la cometa, con lo que consiguió cargar una botella de Leyden con la electricidad de una nube tormentosa demostrando, pues la naturaleza eléctrica del rayo.

El estudio cuantitativo de la electricidad comienza cuando Coulomb en el año 1777, estudiando la fuerza ejercida entre dos cargas consideradas puntuales mediante una balanza

de torsión llegó a la expresión de la ley que lleva su nombre y cuya expresión es similar a la Ley de Gravitación Universal de Newton.

El paso del estudio de la electrostática al de la corriente eléctrica fue facilitado con la invención de la pila eléctrica en 1800 por A. Volta, pues su pila proporcionaba corriente más estable y duradera que la de la botella de Leyden.

Los experimentos de Oersted (1820) y Faraday (1831) demostraron que el fenómeno de la electricidad va siempre acompañado de fenómeno magnéticos, estudiándose ambos conjuntamente y dando lugar a uno de los apartados más notables de la Física: el electromagnetismo [2].

Para ello se pretende mostrar la capacidad de conducir la corriente eléctrica de algunos materiales muy utilizadas en la vida cotidiana: cristal, grafito (un lápiz), cobre, mercurio, agua salada y agua destilada.

La medida de la conductividad de una sustancia viene expresada por un coeficiente inverso llamado resistividad, de manera que cuanto menor es este coeficiente mayor es el grado de conducción eléctrica de una sustancia.

Según este parámetro, la plata es el elemento mejor conductor que existe (a 20°C) con una resistividad de  $1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , seguida del cobre con  $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ .

Algunos metales y ciertos compuestos presentan una resistencia eléctrica virtualmente nula cuando se hallan a temperaturas inferiores a la denominada temperatura crítica ( $T_c$ ). A estos materiales en estas condiciones se les conoce como superconductores (descubiertos por el físico alemán H. Kamerlingh Onnes en 1911) y su resistividad es 1017 veces menor que la del cobre.

## 2.1.2. Resistencia

La corriente eléctrica es el flujo de cargas eléctricas. En un conductor sólido son los electrones los que transportan la carga. En los fluidos, el flujo de carga eléctrica puede



deberse tanto a los electrones como a los iones positivos y negativos. La cantidad de corriente que fluye por un circuito depende del voltaje suministrado por la fuente, pero además depende de la resistencia que opone el conductor al flujo de carga, es decir, la resistencia eléctrica [3,4].

La resistencia  $R$  de un conductor es proporcional a su longitud  $l$  e inversamente proporcional al área de su sección transversal  $S$ : [5]

$$R = \rho \ l / S \quad (1)$$

La constante de proporcionalidad  $\rho$  se denomina resistividad del material, que depende del material con que está fabricado el conductor y de la temperatura (de aquí se deduce que  $R$  también depende de la temperatura). Separar la dependencia de la resistencia en las dimensiones y en el tipo de material de un conductor es útil para el cálculo de resistencias. A la inversa de la resistividad se denomina conductividad  $\sigma$

$$\sigma = 1 / \rho \quad (2)$$

Ohm realizó experimentos sobre la capacidad de los metales para conducir electricidad. En 1826 presentó sus resultados resumidos en una ley, la Ley de Ohm, que expresa que la corriente que fluye a través de un conductor metálico a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial que hay entre los extremos del conductor. A la relación entre la diferencia de potencial aplicada en los extremos de un conductor y la corriente que atraviesa ese conductor suele denominarse característica voltaje-corriente ( $V$ - $I$ ) del material. Ohm encontró experimentalmente que para un dado conductor metálico esta relación es proporcional, es decir, se duplica o se triplica la diferencia de potencial, se duplica o se triplica la corriente, respectivamente.

Dicho de otro modo, cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, crea en éste una diferencia de potencial directamente proporcional a la corriente. La constante de proporcionalidad entre el voltaje y la corriente es la resistencia eléctrica  $R$ . La mayor o

menor resistencia de un conductor es la mayor o menor dificultad que opone al paso de la corriente. Y así tendremos buenos y malos conductores de la corriente en función de que tengan baja o alta resistencia, respectivamente.

Obviamente, los aislantes (no conducen la corriente) tendrán una resistencia altísima. Si se representa la resistencia del conductor con el símbolo  $R$ , la diferencia de potencial en los extremos del conductor con  $V$ , y la corriente que circula por él con  $I$ , la ley de Ohm puede formularse como:

$$V = IR \quad (3)$$

que es lo mismo que decir:

$$I = V / R \text{ ó } R = V / I \quad (4)$$

La unidad de resistencia eléctrica es el Ohm, simbolizado por la letra griega  $\Omega$  (omega). El Ohm es una resistencia tal del conductor que cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 Volt a sus extremos, hay un flujo de una corriente de 1 Ampere.

La diferencia de potencial que existe entre los extremos del conductor surge de la fuerza electromotriz de la fuente de electricidad, que puede ser una pila o una batería. Si una corriente pequeña fluye en el conductor, entonces éste debe oponer una gran resistencia al paso de la corriente. Y análogamente, una resistencia pequeña produce una corriente grande para una misma diferencia de potencial.

Los materiales que verifican la ley de Ohm, es decir, aquellos en donde la intensidad es proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos, se denominan materiales óhmicos. Aquellos en los que la intensidad no depende linealmente de la diferencia de potencial entre los extremos se llaman materiales no óhmicos.

### 2.1.3. Propiedades eléctricas

De acuerdo a la forma de cómo se realizan los mecanismos de conducción eléctrica en un material se realiza una clasificación de los materiales de la forma siguiente:

- En materiales conductores, p.ej. metales (hilo de cobre), se precisa una alta conductividad eléctrica para transportar corriente eléctrica y energía sin pérdidas.
- En materiales aislantes, p.ej. cerámicos o polímeros, se precisa una conductividad eléctrica muy baja (dielectricidad) para impedir la ruptura dieléctrica del material y los arcos eléctricos entre conductores.
- En materiales semiconductores:
  - P.ej.: dispositivos fotoeléctricos. Se necesita optimizar sus propiedades eléctricas para que con ellos se puedan fabricar fuentes prácticas y eficientes de energías alternativas.
  - P.ej.: transistores, circuitos lógicos, entre otros. El estudio y posterior mejora de sus propiedades eléctricas permite la fabricación de “chips” y ordenadores más rápidos y pequeños.

De acuerdo a la estructura atómica se tiene otra clasificación de los materiales:

- La carga eléctrica (y su movimiento) es la responsable de las propiedades eléctricas de un material.
- Tipos de cargas eléctricas móviles en un material: electrones, huecos (espacios dejados por los electrones) e iones.
- Tipos de enlaces según los materiales:
  - Metálico: los electrones están compartidos por todos los núcleos atómicos del material (nube electrónica). Facilidad de movimiento.
  - Covalente: los electrones están compartidos por un par de átomos. Alto grado de localización electrónica y gran dificultad de movimiento por el material.
  - Iónico: iones positivos y negativos forman el material mediante fuertes interacciones electrostáticas, por tanto, los electrones tienen una gran dificultad de movimiento por el material [6].

## 2.1.4. Resistividad

La medición de resistividad (inverso de la conductividad eléctrica) nos proporciona la información necesaria para poder clasificar a los materiales como: conductores, semiconductores y aislantes. Para poder medir la resistividad en diferentes materiales es necesario tener contactos ohmicos en la superficie de la película. En el caso de semiconductores con una banda prohibida mayor a 1 ev es relativamente difícil obtener contactos ohmicos. Normalmente se evaporan contactos de oro, plata, aluminio y se realizan pruebas para determinar que se tiene un buen contacto electrodo-película [1]. Cuando no se tiene la infraestructura para evaporar contactos sobre la superficie del material a medir, se utiliza la técnica de medición de la conductividad por 4 puntas colinéales (ver figura 1). Esta técnica tiene la ventaja de que no son necesarios contactos ohmicos en la superficie de la película.

El método de medición de resistividad por 4 puntas consiste en colocar 4 electrodos colinéales sobre la muestra, entonces por los electrodos laterales se circula una corriente constante  $I$  y en los electrodos internos se inducirá un voltaje  $V$ . La resistividad se calcula a partir de la densidad de corriente y el voltaje inducido. Considerando que las líneas de corriente son radiales entonces la densidad de corriente y el voltaje inducido están dados por:

$$J = \frac{\hat{i}r}{2\pi\delta r} - \frac{\hat{i}r'}{2\pi\delta r'} \quad V = -\rho \int_{2s}^s J dr \quad (5a)$$

$$V = \frac{i\rho}{2\pi\delta} \int_s^{2s} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{3s-r} \right) dr \quad (5b)$$

Encontrando la solución de la integral y despejando la resistividad se tiene la expresión para la resistividad [5]:

$$\rho = (V/I) * ((\pi*d)/\ln 2) = 4.5324*d*(V/I) \quad (5c)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad,  $d$  es el grosor de la película,  $V$  es el voltaje medido,  $I$  es la corriente aplicada.

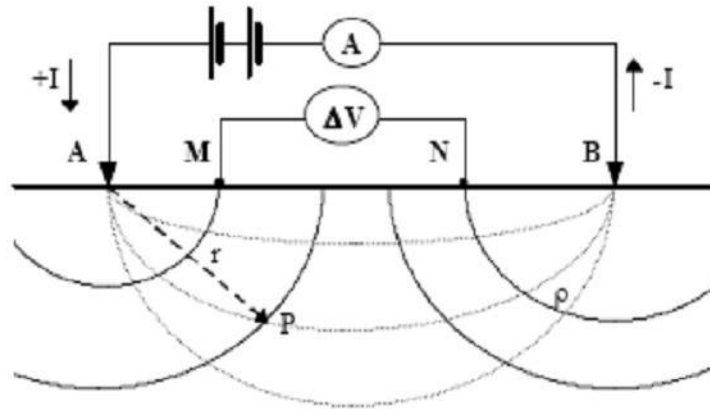


Figura 1. Diagrama esquemático de la medición de resistividad por 4 puntas colinéales.

### 2.1.5. Condiciones de medición de resistividad

Existen materiales cuya principal característica es cambiar de estructura a una cierta temperatura. En estos casos la medición de la resistividad debe realizarse en función de la temperatura, es decir se requiere un arreglo especial de medición que permita controlar la temperatura [7].

También la resistividad depende de las condiciones ambientales a las cuales el material está expuesto. Cuando un metal está expuesto al ambiente se genera una pequeña capa de óxido sobre la superficie ocasionando que la resistividad cambie superficialmente.

Para estos casos la medición de resistividad debe realizarse en ambientes inertes o en vacío (sin moléculas de oxígeno). En otros casos la situación es inversa es decir se requiere conocer el efecto del oxígeno sobre una película metálica o bien algún cambio físico-químico de un material en función de la temperatura en presencia de algún gas a controlar.

Por lo tanto en la medición de resistividad es muy importante tener una celda especial que permita proteger tanto al material como a la medición de los efectos del ambiente tal como ráfagas de viento o bien impurezas del ambiente. Este tipo de celda debe tomar en cuenta

que la medición se puede realizar con temperatura, o que la medición se debe realizar bajo la supervisión del investigador facilitando su observación.

## **2.2. Comunicación GPIB**

### **2.2.1. Introducción del GPIB**

GPIB es un bus y un protocolo estándar para el control y comunicación con instrumentos de medida, como multímetros digitales, osciloscopios, etc, que permite configurar sistemas automáticos en el laboratorio y en la industria con gran flexibilidad y potencia. En este trabajo describimos el estándar GPIB, incluyendo sus características eléctricas, lenguaje de comunicación y las herramientas existentes para la programación [8].

### **2.2.2. Descripción de GPIB**

GPIB es un estándar de conexión que permite la comunicación de un ordenador con instrumentos electrónicos de medida, como pueden ser generadores de funciones, osciloscopios, etc. Las siglas corresponden a *General Purpose Interface Bus*, pero a pesar de este nombre, fue diseñado específicamente para la conexión de instrumentos de medida. Fue creado en 1965 por la compañía Hewlett-Packard, que lo denominó originalmente HP-IB, y se popularizó con rapidez, debido a sus altas tasas de transferencia de datos (8 Mbytes/s) [8]. Para evitar la dispersión de características, los principales fabricantes acordaron la estandarización del GPIB en 1975 (IEEE 488.1), centrándose en las características eléctricas y mecánicas del bus. Una segunda estandarización (IEEE 488.2 de 1987) delimitó de forma más concreta la programación del GPIB, definiendo comandos de aparatos, formato de mensajes y estado de los instrumentos. El siguiente paso de importancia fue la adopción del formato de comandos SCPI, que estructura las órdenes a los aparatos de forma coherente, permitiendo (hasta cierto punto), la sustitución de instrumentos de distintos fabricantes con mínimos cambios.

### 2.2.3. Estructura de un sistema GPIB

Un sistema GPIB IEEE-488 consiste en una serie de instrumentos de medida conectados a un bus, y controlados, normalmente, por un PC dotado de una tarjeta GPIB. Existe bastante libertad en la configuración topológica del bus, en general, es una combinación de disposiciones lineales y en estrella, como se muestra en la figura 2.

El dispositivo controlador (normalmente un PC dotado de una tarjeta GPIB) gestiona el flujo de datos y comandos a los diferentes elementos del sistema.

El IEEE-488 permite que 15 dispositivos inteligentes compartan un simple bus, con el dispositivo más lento determinando la velocidad de transferencia. La máxima velocidad de transmisión está sobre 1 Mbps [8]. Las 16 líneas que componen el bus están agrupadas en tres grupos con sus funciones: bus de datos, bus de control de transferencia de datos y bus general. Algunas de ellas tienen retornos de corrientes comunes y otras tienen un retorno propio, lo que provoca un aumento del número de líneas totales.



Figura 2. Ejemplo de configuración de un sistema GPIB

### 2.2.4. Características eléctricas del GPIB

El bus de transmisión de datos de GPIB es de 8 bits en paralelo, y lógica negativa con niveles TTL estándar (cierto si el voltaje es  $\leq 0.8$  V y falso si el voltaje es  $\geq 2.0$  V). Los cables y conectores tienen el aspecto típico mostrado en la figura 3:

El bus consta de 24 pines, repartidos de la siguiente forma:

- 8 líneas de transmisión de datos (DIO1-DIO8).

- 3 líneas para el control asíncrono de la comunicación (NRFD, NDAC y NRDAV). Mediante estas líneas se verifica la correcta transmisión de los datos, que es una de las fortalezas del GPIB.
- 5 líneas que gestionan la transmisión de comandos (ATN, IFC, REN, SRQ y EOI).
- El resto componen las tierras de las diferentes líneas. Para que el bus GPIB alcance la velocidad de transmisión para el que fue diseñado (hasta 8 Mbytes/s), deben cumplirse los siguientes **requisitos**:
- Puede haber un máximo de 15 dispositivos conectados al bus, y al menos dos tercios de ellos deben estar encendidos.
- La separación máxima entre dos dispositivos es 4 m, y la separación promedio en toda la red debe ser menor de 2 m.
- La longitud total de la red no debe exceder los 20 m.



Figura 3. Cable y conectores GPIB.

### 2.2.5. Descripción de los pines de salida del GPIB

Las líneas DIO1 con DIO8 se utilizan para transferir direcciones, la información de control y datos. Los formatos para las direcciones y los octetos del control son definidos por el estándar de IEEE 488. Los formatos de datos son indefinidos y pueden ser ASCII (con o sin paridad) o binarios. DIO1 es el bit menos significativo (nota que esto corresponderá al bit 0 en la mayoría de las computadoras). La tabla 1 muestra la descripción de cada uno de los pines [8].



24-Pin GPIB Bus PinOut					
Pin #	Signal Names	Signal Description	Pin #	Signal Names	Signal Description
1	DIO1	Data Input/Output Bit 1	13	DIO5	Data Input/Output Bit 5
2	DIO2	Data Input/Output Bit 2	14	DIO6	Data Input/Output Bit 6
3	DIO3	Data Input/Output Bit 3	15	DIO7	Data Input/Output Bit 7
4	DIO4	Data Input/Output Bit 4	16	DIO8	Data Input/Output Bit 8
5	EIO	End-Or-Identify	17	REN	Remote Enable
6	DAV	Data Valid	18	Shield	Ground (DAV)
7	NRFD	Not Ready For Data	19	Shield	Ground (NRFD)
8	NDAC	Not Data Accepted	20	Shield	Ground (NDAC)
9	IFC	Interface Clear	21	Shield	Ground (IFC)
10	SRQ	Service Request	22	Shield	Ground (SRQ)
11	ATN	Attention	23	Shield	Ground (ATN)
12	Shield	Chassis Ground	24	Single GND	Single Ground

Tabla 1. Descripción pines GPIB.

### 2.2.6. Hardware disponible para sistemas GPIB

Un sistema típico constará de un ordenador con una tarjeta controladora GPIB, más los instrumentos (compatibles con IEEE 488, obviamente). Existen tarjetas GPIB para prácticamente todos los ordenadores presentes en el mercado (PC, Macintosh, estaciones Sun, Silicon Graphics, DEC Alpha, HP RS/6000, etc). En el caso concreto del PC, las controladoras GPIB pueden conectarse al bus ISA, PCI, PCMCIA (portátiles), USB,

Ethernet, Firewire, y los puertos serie y paralelo. Existen asimismo adaptadores para los estándares de comunicación RS-232 y RS-485. La figura 4 muestra una tarjeta GPIB.

En la mayoría de los sistemas industriales, un PC con el sistema operativo DOS es suficiente para controlar el bus GPIB. La tarjeta GPIB se instala en un slot ISA o PCI libre. Si tanto la tarjeta como el sistema operativo son *plug and play*, en principio será reconocida y configurada automáticamente. En caso contrario (por ejemplo, bajo DOS), debemos elegir de forma manual:

- El puerto de entrada/salida, entre los valores 100h y 3F8h.
- El canal DMA, si se va a utilizar.
- La línea de petición de interrupción (IRQ), entre 2 y 7, también si queremos utilizarla.

Estos parámetros deben tomarse de forma que no produzcan conflictos con otras tarjetas instaladas en la PC. La figura 4 muestra una tarjeta GPIB.



Figura 4. Tarjeta PCI-GPIB.

## 2.3. Comunicación serie: Protocolo RS-232.

### 2.3.1. Introducción

RS-232.C significa literalmente "Recomended Standard 232 revisión C" (también conocida como EIA 232). Es un estándar publicado en 1969 por la EIA

("Electronic Standard Association") que define las características eléctricas que deben presentar los elementos de conexión para la comunicación serie entre ordenadores y equipos periféricos. Su título dice exactamente: "Conexión entre un Equipo Terminal de Datos y un Equipo de Comunicación de Datos empleando un intercambio de datos binario serie", y comprende diversos apartados. La figura 5 muestra el cable de conexión RS-232 [9].

Los diseñadores del IBM PC ya previeron la posibilidad de comunicación serie, para lo que posibilitaron la instalación de hasta 7 puertos de comunicaciones serie asíncronas RS-232.C (aunque es raro instalar más de dos); para atender estos puertos dispusieron de los correspondientes servicios en la BIOS. En los primeros modelos la electrónica necesaria no estaba incluida en la placa-base, por lo que los puertos debían instalarse en adaptadores de tarjeta que se insertaban en cualquiera de los slots disponibles.



Figura 5. Cable de conexión RS-232

Las direcciones de puerto utilizadas son las siguientes: 2E8-2EF (COM4); 2F8-2FF (COM2); 3E8-3EF (COM3); 3F8-3FF (COM1). Los adaptadores generalmente utilizan las interrupciones IRQ3 (COM2, COM4) y IRQ4 (COM1, COM3) [9]. La comunicación serie ha permitido conectar diversos dispositivos al ordenador, como un ratón; una impresora u otro ordenador, aunque su aplicación principal han sido las telecomunicaciones a través de módem.

### 2.3.2. Características de la comunicación serie

Para comprender bien algunos aspectos de las comunicaciones serie, hay que tener en cuenta que este tipo de comunicación eléctrica precede en bastantes años a la aparición de los ordenadores electrónicos. La comunicación serie tiene sus raíces en el telégrafo, que posteriormente derivó en el teleimpresor (Telex), donde se utilizaron diversos protocolos de comunicación; los más famosos el Morse el Baudot y el ASCII [9]. Posteriormente las comunicaciones serie informáticas adoptaron algunos de los usos y costumbres existentes adaptándolos a las nuevas necesidades, empezando por su propio sistema de códigos (ASCII), pero que conservando algunas reminiscencias de sus ancestros telegráficos. Tanto el sistema de codificación ASCII (American Standard Code for Information Interchange), como el propio estándar RS-232 nacieron pensado en transmisiones serie utilizadas casi exclusivamente para tele-impresión. Las señales y protocolos empleados se referían a cuestiones tales como sonar una campana para recabar la atención del operador, y enviar un retorno de carro CR (Carriage Return) o un salto de línea LF (Line feed) -eran impresoras electro-mecánicas-. La comunicación serie entre ordenadores no requiere tantas señales, sin embargo se siguieron utilizando la terminología y muchas de las señales del estándar primitivo.

En la comunicación serie los bits se transmiten uno detrás de otro (de ahí el nombre), lo que hace que sean mucho más lentas que sus homólogas "paralelo" en las que se transmiten varios bits a la vez. La ventaja es que puede utilizarse un solo par de hilos, o incluso uno solo (si el retorno se realiza por la tierra). Existen varias formas de transmisiones serie:

**Simplex:** Un equipo transmite, el otro recibe.

**Half-duplex:** Transmiten ambos equipos pero no simultáneamente; los equipos se alternan en la transmisión, uno transmite mientras el otro recibe.

**Full-duplex:** Ambos equipos transmiten simultáneamente. Para ello se requieren dos líneas independientes, transmisión y recepción; la línea de transmisión de un equipo se conecta a la entrada de recepción del otro y viceversa. Los puertos serie del PC son capaces de utilizar este modo.

**Síncronas:** Los dispositivos que comunican se sincronizan en el momento inicial de la transmisión y constantemente se intercambian información a una cadencia predefinida. Con objeto de mantener la sincronización, cuando no existen datos que enviar se transmiten caracteres sin valor ("idle characters").

Esta transmisión es más rápida que la asíncrona porque no es necesario transmitir señales de inicio o fin de dato; constantemente se reciben caracteres que pueden ser de datos o sin valor (de relleno).

**Asíncronas:** En este modo de transmisión no existe sincronización; no es necesario enviar caracteres de relleno, pero hay que indicar cuando empieza un dato y cuando termina. Esto se hace incluyendo en la transmisión señales de inicio y fin de dato (bits de "start" y "stop"). En la comunicación asíncrona, la información (cada carácter) es enviada en el interior de un cuadro ("Frame") de tamaño variable, que comienza con la mencionada señal de inicio y termina con la de final; es el tipo de comunicación utilizada en los puertos serie del PC.

En este tipo de comunicación, el estado de reposo (cuando no se transmite nada) se identifica con un "1" (marca). Cuando se recibe un bit de inicio, que es un "0" (espacio), el receptor toma nota que va a comenzar a recibir un dato.

Esta forma de asignación aparentemente ilógica (llamar "1" -marca- a la ausencia de señal), tiene también sus orígenes en el telégrafo (las comunicaciones utilizadas en telégrafos y teleimpresores eran asíncronas), donde se constató que había menos errores si se utilizaba siempre una tensión en la línea (para indicar reposo) y se cambiaba para señalar el dato. Este sistema tiene la ventaja adicional que el receptor puede distinguir una línea ociosa de una desconectada [9].

Esta forma de operación es también el origen de un malentendido respecto a las transmisiones por módem, que utilizan un equivalente audible de las tensiones de señal (ver a continuación el apartado Características Eléctricas). En este caso, los dos estados de

tensión han sido sustituidos por dos tonos audibles; el estado de reposo (marca) está señalado por el tono más elevado, de modo que cuando no existe transmisión se está transmitiendo un tono que ha sido erróneamente interpretado como señal de portadora, circunstancia reforzada por el nombre de la señal CD (Carrier Detect) que en realidad debía denominarse Detección de Señal de Recepción.

Los parámetros que caracterizan estas comunicaciones son: velocidad; paridad; bits de datos y bits de parada. En la literatura sobre el tema es frecuente expresar estos datos en forma resumida. Por ejemplo: 1200 8 N 1 para indicar una transmisión de 1200 baudios con 8 bits de datos sin paridad y un bit de Stop [9].

Los parámetros anteriores están relacionados con la forma en que se transmite la información serie. En esta comunicación cada carácter va incluido en un cuadro ("Frame"); generalmente el comienzo es un bit de inicio (siempre un 1); después le sigue el dato, que puede ser de 5 a 8 bits de longitud; después puede haber un bit de control de paridad, y por último un bit final (siempre es un 1) de longitud variable (el equivalente a 1, 1.5 o 2 bits).

**Velocidad de transmisión** ("Connection speed") es la cantidad de datos transmitidos en unidad de tiempo. Se expresa en bits por segundo (bps). En las transmisiones serie a través de líneas telefónicas, en las que se emplean módems (H11.1) era frecuente utilizar como medida de velocidad el Baudio ("Baud rate"), en honor de Emile Baudot, al que ya hemos hecho referencia. Baudio se define como el número de veces que cambia la portadora en un segundo. La velocidad que puede emplearse depende en gran medida de la calidad del medio de transmisión (calidad de la línea), que si (como es frecuente) se trata de líneas telefónicas, depende a su vez de la distancia.

Los primeros dispositivos serie operaban a velocidades muy bajas, del orden de 110 a 1200 baudios. Las comunicaciones telefónicas serie actuales están muy cerca del máximo teórico que pueden soportar los pares de cobre utilizados en la telefonía estándar. Además, para aumentar el rendimiento de la comunicación se utilizan técnicas de compresión de los datos a transmitir, y velocidades variables, que pueden ser negociadas entre los equipos que comunican en función del estado de la línea en cada momento.

**Longitud del carácter** ("Char length"). Se han utilizado caracteres de 5, 6, 7 y 8 bits, aunque actualmente los datos son enviados como caracteres ASCII, por lo que pueden utilizarse 7 u 8 bits según se trate del juego de caracteres US-ASCII o el extendido (E2.2.1a). El conjunto de bits que componen un carácter se denominan bits de dato ("Data bits").

**Paridad** ("Parity"). Para poder comprobar la calidad de la transmisión se suele utilizar un sistema de control de paridad que añade un bit a los bits de datos. Los sistemas utilizados son:

- Paridad par ("Even").
- Paridad impar ("Odd").
- Paridad marca ("Marck").
- Paridad espacio ("Space").
- Sin paridad (no se añade ningún bit de paridad al datagrama)

Los sistemas de paridad par e impar se ha explicado al tratar de la memoria (H5.3); ambos métodos cuentan el número de unos contenidos en los bits de datos y añade un uno o un cero según el resultado. Por su parte la paridad Mark indica que se incluirá siempre una marca (bit de valor "1") como bit de paridad, mientras que la paridad Space añade siempre un espacio ("0"). Evidentemente estos dos últimos sistemas no aportan absolutamente ninguna información, por lo que son usados muy raramente [9].

**Bits de parada** ("Stop bits"). Después que se envía un carácter se envía un bits de parada, que tienen el valor "1" (marca); la duración de este bit puede ser 1, 1.5 o 2 períodos.

### 2.3.3. Características eléctricas. Conectores.

Como hemos señalado, las normas y terminología de las comunicaciones serie están muy influenciadas por sus orígenes telegráficos. Esto incluye algunas de las definiciones utilizadas por la norma RS-232.

Una curiosidad de esta norma es que la transmisión de los caracteres ASCII se realiza empezando por el bit menos significativo. Puesto que estamos acostumbrados a representarlos de derecha a izquierda (empezando por el más significativo), podría decirse que los bits son transmitidos al revés.

Los datos se transmiten en binario, pero no es frecuente referirse a ceros y unos como en la informática convencional, sino a espacios y marcas.

El estándar RS-232 define un conector DB de 25 pines del que sólo se utilizan 22; las señales están pensadas para la comunicación remota de teleimpresores, y actualmente no son realmente necesario para comunicar ordenadores, por lo que se han estandarizado el uso de 8 (las ocho grandes) que pueden ser utilizadas en conectores de 25 pines o de 9 [9].

En la tabla 2 se muestran los nombres, las señales y la asignación de pines utilizada en el estándar para un DTE (se han resaltado las señales correspondientes a las ocho grandes, el nivel de referencia y a la protección).

Nota: Básicamente el DTE transmite por la patilla 2 y recibe por la 3. El significado de las flechas es el siguiente:

DTE (Data Terminal Equipment) Puerto PC

DCE (Data Communication Equipment) Instrumento

<b>Pin</b>	<b>Nombre</b>	<b>RS232</b>	<b>Direc. Descripción</b>
1	GND	n/a	Shield Ground (tierra de protección)
2	TXD	BA	Transmit Data
3	RXD	BB	Receive Data
4	RTS	CA	Request to Send
5	CTS	CB	Clear to Send
6	DSR	CC	Data Set Ready
7	GND	AB	System Ground (nivel de referencia)



8	CD	CF	Carrier Detect
9	-	-	Reservado
10	-	-	Reservado
11	STF		Select Transmit Channel
12	S.CD	SCF	Secondary Carrier Detect
13	S.CTS	SCB	Secondary Clear to Send
14	S.TXD	SBA	Secondary Transmit Data
15	TCK	DB	Transmission Signal Element Timing
16	S.RXD	SBB	Secondary Receive Data
17	RCK	DD	Receiver Signal Element Timing
18	LL	LL	Local Loop Control
19	S.RTS	SCA	Secondary Request to Send
20	DTR	CD	Data Terminal Ready
21	RL	RL	Remote Loop Control
22	RI	CE	Ring Indicator
23	DSR	CH	Data Signal Rate Selector
24	XCK	DA	Transmit Signal Element Timing
25	TI	TM	Test Indicator

Tabla 2. Señales RS-232 C

Las conexiones externas de los puertos serie del PC se han estandarizado en 2 tipos de conectores de 9 y 25 pines (DB9 y DB25), con el macho del lado del ordenador.

En la tabla 3 se muestra la asignación de pines para ambos conectores. Los nombres de las señales se refieren a los utilizados en la tabla-1 (N.A. = No aplicable; N.C. = No conectado).

Pin	DB9	DB25
1	CD	GND
2	RXD	TXD

3	TXD	RXD
4	DTR	RTS
5	GND	CTS
6	DSR	DSR
7	RTS	GND
8	CTS	CD
9	RI	N.C.
10	N.A.	N.C.
11	N.A.	N.C.
12	N.A.	N.C.
13	N.A.	N.C.
14	N.A.	N.C.
15	N.A.	N.C.
16	N.A.	N.C.
17	N.A.	N.C.
18	N.A.	N.C.
19	N.A.	N.C.
20	N.A.	DTR
21	N.A.	N.C.
22	N.A.	RI
23	N.A.	N.C.
24	N.A.	N.C.
25	N.A.	N.C.

Tabla 3. Asignación de los pines de los conectores DB9 y DB25.

## 2.4. Lenguaje de programación LabView 7.1.

### 2.4.1. Introducción

LabVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes características:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el *lenguaje C* o *BASIC*. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o *lenguaje G* para crear programas basados en diagramas de bloques [10].

Para el empleo de LabVIEW no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan *Instrumentos Virtuales (VIs)*, porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los *VIs* tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros *VIs*.

Todos los *VIs* tienen un *panel frontal* y un *diagrama de bloques*. Las *paletas* contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los *VIs*. A continuación se procederá a realizar una somera descripción de estos conceptos [10].

### 2.4.2. Panel Frontal

Se trata de la interfaz gráfica del *VI* con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un *panel frontal* está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

Cada uno de ellos puede estar definido como un *control* (a) o un *indicador* (b). Los primeros sirven para introducir parámetros al *VI*, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación. Una representación del panel frontal se muestra en la figura 6.

### 2.4.3. Diagrama de bloques

El *diagrama de bloques* constituye el código fuente del *VI*. En el *diagrama de bloques* es donde se realiza la implementación del programa del *VI* para controlar o realizar cualquier procesado de las entradas y salidas que se crearon en el *panel frontal*.

El *diagrama de bloques* incluye *funciones* y *estructuras* integradas en las librerías que incorpora LabVIEW. En el *lenguaje G* las *funciones* y las *estructuras* son nodos elementales. Son análogos a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales. Una representación del panel frontal se muestra en la figura 6.

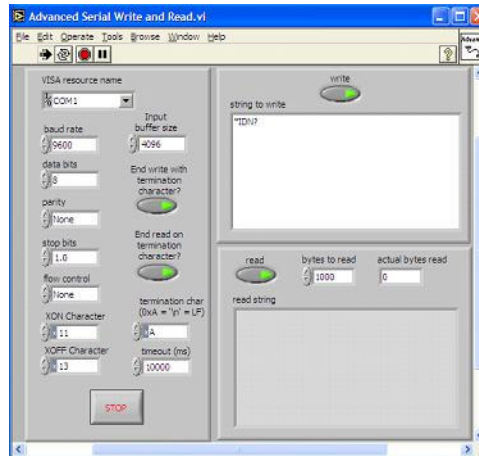


Figura 6. Panel Frontal de un programa en LabView.

Los *controles* e *indicadores* que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los *terminales*. A continuación se presenta un ejemplo de lo recién citado:

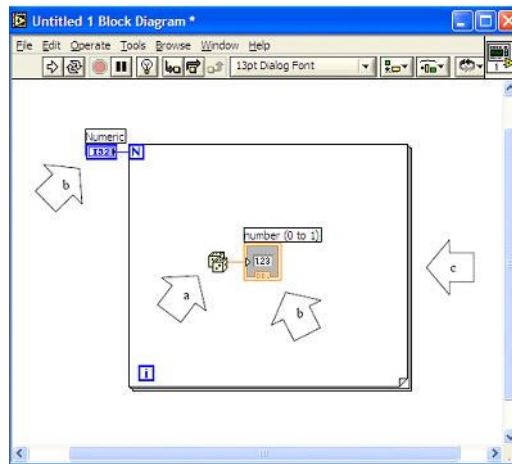


Figura 7. Diagrama de bloques de un programa en LabView.

- (a) Función.
- (b) Terminales (control e indicador).
- (c) Estructura.

El *diagrama de bloques* se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratará. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos [10].

LabVIEW posee una extensa biblioteca de *funciones*, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las *estructuras*, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle *for*, *while*, *case*,...). Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

## 2.4.4. Paletas

Las *paletas* de LabVIEW proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el *panel frontal* como el *diagrama de bloques*. Existen las siguientes paletas:

### 2.4.4.1 Paletas de trabajo

Tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques, existe una paleta de herramientas, que sirve tanto para editar el VI, o ejecutarlo según el modo de trabajo que se tenga.

Cuando se trabaja en modo de ejecución la paleta es la de la figura 8.



Figura 8. Paleta de herramientas del programa LabView.

Con el botón “Ejecutar” se corre una vez el programa. Cuando está ejecutando, se cambia a rayado como se aprecia en la figura y aparece un botón de “Stop” con el cual se puede

detener el programa. No es recomendado hacer esto, es preferible crear un algoritmo de paro del programa, con un botón destinado exclusivamente para esto [10].

Algunos programas al terminar deben de ejecutar algunas operaciones de cierre, como puede ser en la programación de tarjetas de adquisición de datos, o en el cierre de archivos, por tanto si se usa el botón de stop, éste parará el programa totalmente, en el punto en el que se encontraba y no permitirá que complete sus rutinas de cierre, pudiendo incurrir en errores y pérdida de la información.

Cuando la flecha aparece rota indica que hay un error en el programa. Al hacer click se muestra una lista de errores, y al hacer click en cada uno de los errores se apreciará en el diagrama la ubicación de la falla.

- “Modo” cambia entre modo de edición y modo de ejecución. Así está en modo de ejecución.
- “Corrido sucesivo” hace que el programa ejecute una vez tras otra hasta que se le de un paro con el botón de stop.
- “Punto de paro” al ser presionado cambia a “!”, así, al ser llamado como subrutina, abrirá el panel frontal para mostrar como cambia, para encontrar errores de lógica, o por simple visualización.
- “Modo de corrido” al ser presionado cambia a una línea por pasos, así el programa ejecutará paso a paso. Cada paso se dará al oprimir el icono de un solo paso.

#### **2.4.4.2. Paleta de controles**

En el menú **Controls** aparecen todos los tipos de controles e indicadores que se pueden colocar en el panel frontal, la paleta de controles se muestra en la figura 9 y estos controles pueden ser de diferentes tipos como se describen a continuación:

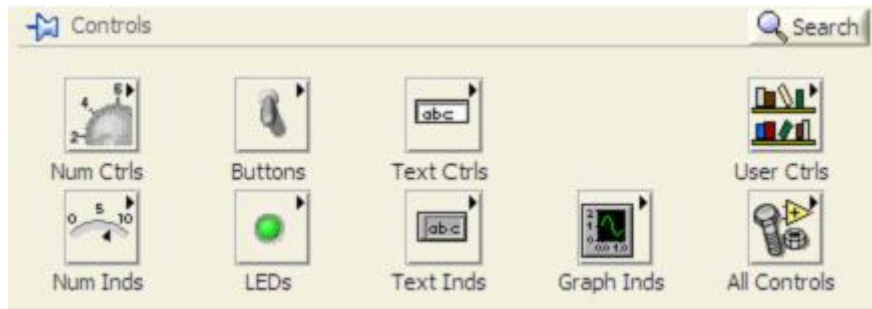


Figura 9. Paleta de controles

1. Controles Numéricos: Permite el control de datos, ya sea en número real enteros, naturales, punto flotante, entre otros. Pueden ser distintos tipos y formas.
2. Indicadores Numéricos: Permiten la entrada y salida de datos y valores medibles de tipo numérico, ya sea en un número real, enteros, naturales positivos. Por ejemplo un medidor de nivel graficado como un tanque, donde el nivel es el valor dado, o un termómetro, donde la temperatura es un variable continua.
3. Boleanos: Permiten la salida y la entrada de datos de tipo discreto, on-off, como es el caso de los pulsadores y switches.
4. String & Path: permite entrar y sacar datos de tipo alfanumérico, vistos en un indicador o control, o en una tabla que también puede cumplir las dos funciones.
5. List & Ring: Son controles e indicadores que presentan listas de opciones donde el item seleccionado se entrega como un valor al programa.
6. Array & Clusters: Permite agrupar datos para formar matrices ya sean de entrada o salida. Estas matrices pueden ser de tipo numérico, o de tipo booleano.
7. Graph: Controles e indicadores de gráficas. Pueden ser gráficas de barrido, graficas XY, o de tonos de colores. Esta paleta se muestra en la figura 10 [10].



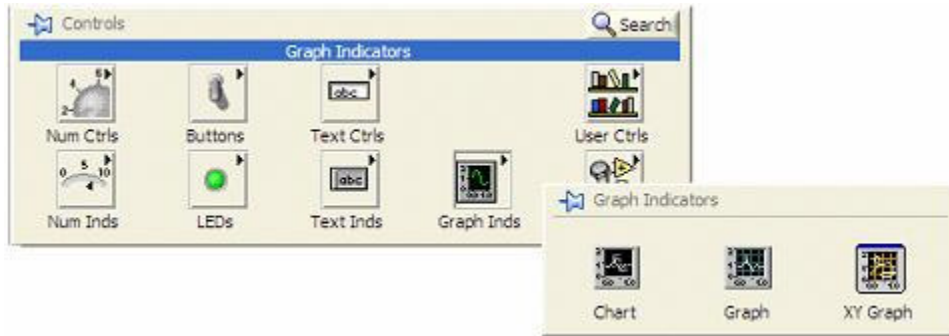


Figura 10. Indicadores gráficos del programa LabView.

### 2.4.4.3. Paleta de funciones

El menú de Functions ofrece todas las posibilidades de funciones que se pueden utilizar en el diagrama de bloques, donde al hacer click se escoge y ubica dentro del programa [10]. La figura 11 muestra los diferentes tipos de funciones que se tienen en el programa LabView y se describen a continuación:

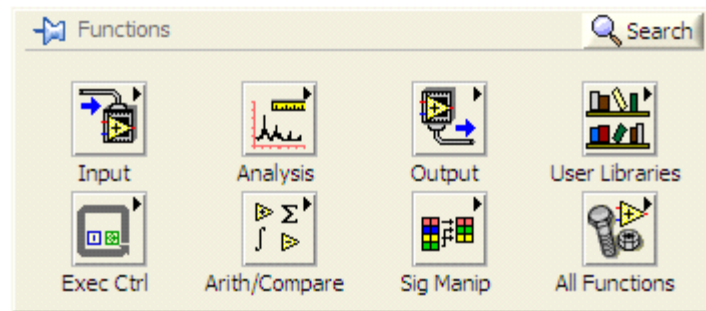


Figura 11. Paleta de funciones del programa LabView.

1. Exec Ctrl: Contiene las estructuras básicas de programación como son las secuencias, los casos, los ciclos For-Next y Mientras.
2. Arithmetic: Presenta las operaciones básicas aritméticas como son suma, resta, multiplicación, números al azar, valor absoluto, compuertas and, or, not y muchas otras.
- 3 Trig & Log: presenta funciones trigonométricas y logarítmicas.

4 Comparison: Funciones de comparación que devuelven un valor de verdadero o falso según se cumpla dicha comparación.

5. Conversión: Conversiones de tipos de variables, de un formato a otro, por ejemplo convertir un número a otro que ocupe 32 bits en memoria, o convertir un número a una matriz de boléanos cuya representación en binario corresponda al número.

6. String: presenta herramientas para manipular cadenas de caracteres. Por ejemplo convertir todos los caracteres a mayúsculas, o reportar el valor de la longitud de la cadena.

7. Array & Cluster: Maneja las herramientas para el uso de matrices y agrupaciones. Ej. Dar las dimensiones de una matriz, en otra de una sola dimensión. Ej agrupar un conjunto de cables en uno solo par manipular menos líneas.

8. File I/O: Para el manejo de archivos y almacenamiento de información en disco.

9. Time & Dialog: Reportadores de tiempo, esperas, fechas, y cuadros que dan anuncios.

10. Analysis: Funciones avanzadas de procesamiento de señales, estadísticas, álgebra lineal, filtros, regresión y otras que requieren de un buen entendimiento matemático.

11. DAQ: Para la adquisición de datos, lectura y escritura de datos a las tarjetas insertables, toma y control de señales análogas y digitales, y control de los circuitos contadores que hay en algunas tarjetas.

12. Instrument I/O: Comunicación con instrumentos medidores a través de puertos GPIB, serial o VISA.

13. Network: Para la comunicación de computadores en red, y enlace entre diferentes aplicaciones, como es el caso del DDE, Dynamic Data Exchange, que puede servir para enlazar aplicaciones de LabView con Bases de datos como ACCES.

## III. Objetivos

### 3.1. Objetivo general

Automatización y construcción de un medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura.

### 3.2. Objetivos específicos

- Construir un medidor de resistividad de 4 puntas.
- Construir un medidor de resistividad de 4 puntas en función de la temperatura.
- Realizar comunicación GPIB con una fuente de voltaje Agilent E3644A para controlar y leer voltaje por PC.
- Realizar comunicación GPIB con un multímetro de banco Agilent 34401A para lectura de corriente por PC.
- Realizar comunicación GPIB con un nanovoltmetro Agilent 34420A para lectura de voltaje por PC.
- Realizar comunicación serie RS-232 con un controlador de temperatura Watlow para programar y leer temperatura por PC.
- Realizar el programa de automatización del medidor de resistividad de 4 puntas en función de la temperatura por PC.

## IV. Justificación y alcance del trabajo

### 4.1. Justificación del trabajo de tesis

Las propiedades eléctricas de los materiales son importantes porque nos permiten clasificar a los materiales de acuerdo a sus características eléctricas. Una propiedad importante es la resistividad. Y existen técnicas específicas para realizar estas mediciones de resistividad. Una de las técnicas más importantes es la técnica de 4 puntas la cual consiste en tener 4 electrodos colineales, por los electrodos externos circular una corriente  $I$  y en los electrodos internos se mide un voltaje inducido  $V$ , a partir de  $V$  e  $I$  se calcula la resistividad  $\rho$  por medio de la ecuación siguiente:

$$\rho = (V/I) * ((\pi * d) / \ln 2) = 4.5324 * d * (V/I) \quad (5c)$$

Donde  $d$  es el grosor de la muestra a medir.

Existen medidores de resistividad 4 puntas colineales en el mercado sin embargo los fabricantes no proporcionan el equipo para medir en función de la temperatura. El poder medir la resistividad en función de la temperatura es importante en la ciencia de materiales porque por medio de esta medición se pueda determinar características cinéticas del material tal como energía de activación de la conductividad, la cual nos permite conocer indirectamente la energía de la banda prohibida de un semiconductor o bien la concentración de electrones en un material.

Por lo tanto construir un medidor de resistividad con la característica especial de medir la resistividad en función de la temperatura es un equipo muy importante en la caracterización de materiales. También el construir un medidor de resistividad en función de la temperatura es un reto para cualquier estudiante en la rama de ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

## 4.2. Alcances

Diseñar, construir y automatizar un medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas en función de la temperatura conteniendo un arreglo de 4 puntas que permita hacer mediciones de resistividad. El prototipo a construir debe tener las características siguientes:

- El prototipo debe realizar automáticamente una medición de resistividad por la técnica de 4 puntas en función de la temperatura por medio de PC.
- El prototipo debe permitir realizar mediciones de resistividad en función de temperatura con razones constantes de calentamiento.
- El prototipo debe soportar temperaturas de hasta 200° C.
- El prototipo debe medir corriente mínima de 1 micro ampere ( $1 \times 10^{-6}$  A).
- El prototipo debe medir voltajes mínimos de 10 nanovolts ( $1 \times 10^{-9}$  V)
- El prototipo debe suministrar corrientes de 10 micro ampere ( $1 \times 10^{-6}$  V)
- **El prototipo debe graficar por computadora la resistividad en función de la temperatura.**

## **V. Hipótesis**

La medición de conductividad es importante en el área de ciencia de materiales por lo tanto el diseñar, construir y automatizar un medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura ayudará a obtener perfiles de resistividad vs temperatura los cuales permitirán calcular otros parámetros cinéticos que son importantes en la caracterización de materiales.

## VI. Metodología

### 6.1. Metodología

La metodología a seguir para realizar este trabajo es el siguiente:

- Revisión bibliográfica: Se hará una revisión bibliográfica de la medición de conductividad, control de temperatura, comunicación GPIB, comunicación serial y programación en LabView.
- Identificación de necesidades: se hará un estudio acerca de las características que debe cumplir un medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura. ¿Que rango de temperatura debe soportar? ¿Cuales serian los valores mínimos a medir de corriente y voltaje? ¿Como realizar las conexiones eléctricas? Y de acuerdo a las necesidades se obtendrán especificaciones concretas para el diseño del medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura.
- A partir de las necesidades anteriores se propondrá un diagrama a bloques para el diseño y la construcción del medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura.
- Basándose en el diagrama a bloques se propondrá la mejor forma de implementar eléctricamente cada bloque cumpliendo con las necesidades especificadas anteriormente.
- Se realizará la construcción eléctrica y mecánica de cada bloque.
- Se hará la conjunción de cada bloque para construir físicamente el medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura.
- Se hará un programa especial utilizando programación LabView para realizar la medición automática de la resistividad en función de la temperatura. Este programa principal constara de pequeños programas que controlaran a cada bloque del diagrama de bloques propuesto.
- Se realizará la unión del medidor de resistividad de 4 puntos en función de la temperatura y el programa que automatizará la medición de resistividad por medio de la PC.

- Se realizará una prueba del medidor construido y automatizado haciendo una medición de la resistividad en función de la temperatura partiendo de temperatura ambiente hasta 200°C con una razón constante de calentamiento de 5°C por minuto.
- Conclusiones.

## 6.2. Métodos

### 6.2.1. Técnica de 4 puntas para medición de resistividad.

El método de medición de resistividad por 4 puntas consiste en colocar 4 electrodos colinéales sobre la muestra (Figura 12), entonces por los electrodos laterales se circula una corriente constante  $I$  y en los electrodos internos se inducirá un voltaje  $V$ . La resistividad se calcula aplicando una fórmula especial la cual toma en cuenta el  $V$  y la  $I$  medidos.

La resistividad para un arreglo de 4 puntas colinéales se calcula por medio de la expresión (5c):

$$\rho = (V/I) * ((\pi * d) / \ln 2) = 4.5324 * d * (V/I) \quad (5c)$$

Donde  $d$  es el grosor de la película;  $F(d)$  Es un factor de corrección de área.

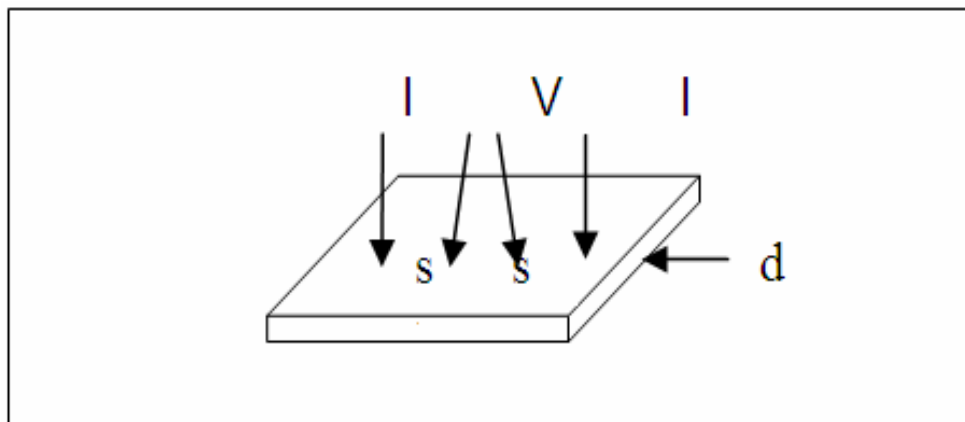


Figura 12. Diagrama esquemático de la medición de resistividad por 4 puntas colinéales.



## VII. Identificación de necesidades y especificaciones

El diseño de un nuevo dispositivo electrónico comienza con la definición de especificaciones y las especificaciones se dan en función de las necesidades del cliente. Por lo tanto, primero se hará un estudio acerca de las necesidades del cliente y que características debe cumplir un medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura.

### 7.1. Medición de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura

El medidor de resistividad es un sistema electrónico el cual permite hacer mediciones en diferentes materiales para saber si son conductores, semiconductores o aislantes. Con un medidor de resistividad también se puede conocer cual es el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura. Cuando se tiene una película delgada es recomendable medir por 4 puntas, ya que esta técnica evita los efectos de los contactos midiendo exclusivamente la resistencia del material. Este método es empleado en la tecnología de circuitos integrados y en dispositivos semiconductores.

El método consiste en colocar 4 electrodos colinéales sobre la muestra, entonces por los electrodos laterales circulará una corriente constante  $I$  y en los electrodos internos se inducirá un voltaje el cual vamos a medir  $V$  (Ver figura 13).

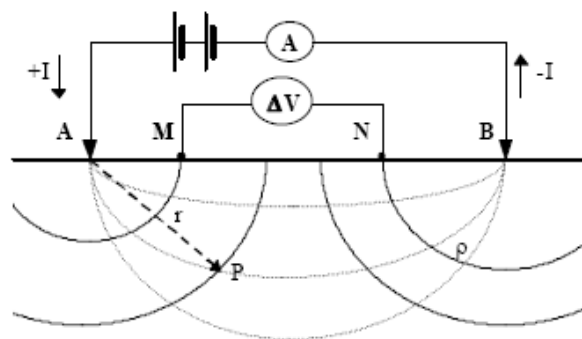


Figura 13. Diagrama de medición de resistividad por 4 puntas

Así el cociente  $V/I$  nos proporcionará la resistencia por cuadrado o resistencia superficial.

Para determinar la resistividad se utiliza la ecuación (5c):

$$\rho = (V/I) * ((\pi * d) / \ln 2) = 4.5324 * d * (V/I) \quad (5c)$$

donde  $V$  es el voltaje inducido,  $I$  es la corriente aplicada y  $d$  es el grosor de la película,  $F(d)$  es un factor de corrección.

La metodología a seguir para realizar una medición manual de la resistividad por la técnica de 4 puntas se muestra en la figura 14.

## **7.2. Especificaciones de un medidor de resistividad de 4 puntas colinéales en función de la temperatura.**

Un medidor de resistividad 4 puntas realiza la medición de resistividad de acuerdo a la figura 13 por lo tanto una especificación a tomar en cuenta es que la medición se debe de realizar de acuerdo al diagrama de flujo anteriormente mencionado.

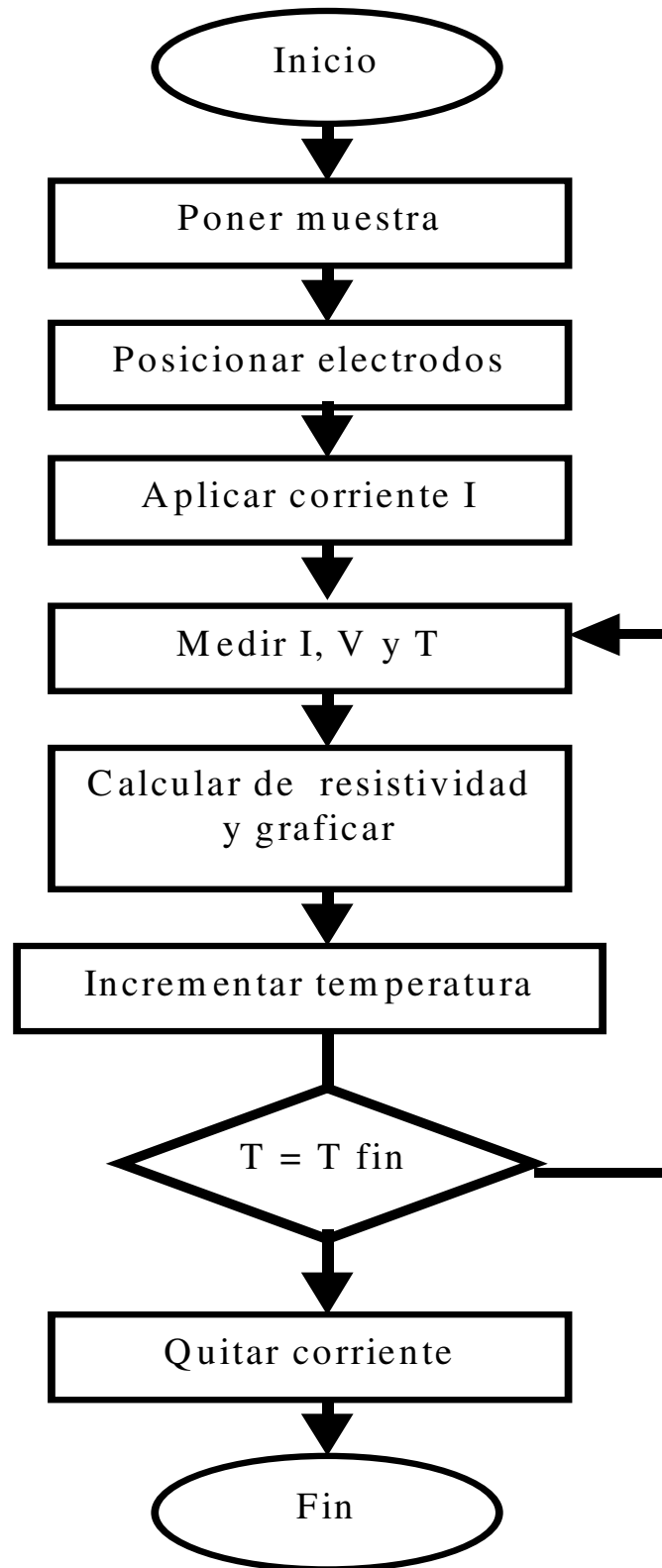


Figura 14. Diagrama de flujo de una medición de conductividad de 4 puntas colinéales.

Como se ha mencionado anteriormente los medidores de resistividad comerciales no tienen la opción de medir la resistividad en función de la temperatura por lo tanto una especificación muy importante a cumplir en el diseño del medidor de resistividad es que permita medir la resistividad en función de la temperatura y en específico que la temperatura pueda ser controlada con una razón de calentamiento constante (por ejemplo de 5° C por minuto) para poder obtener curvas de resistividad vs temperatura en donde la temperatura se incrementa linealmente. Esto es importante porque la resistividad de los materiales es dependiente de la temperatura y estas gráficas de resistividad vs temperatura permite analizar ese comportamiento térmico es decir calcular la energía que el material necesita para variar su resistividad.

De acuerdo a la literatura la medición de resistividad depende de la temperatura y por lo tanto cualquier fluctuación en la temperatura del ambiente ocasiona variaciones indeseables en la medición por lo tanto es muy importante que el medidor a diseñar y construir tenga una celda metálica protectora que lo proteja de las fluctuaciones del ambiente.

Los valores de resistividad de materiales van desde  $10^{+15}$  hasta  $10^{-6}$  ohm\* cm. En nuestro caso se pide que el medidor de resistividad a construir pueda medir resistividades de  $10^{+3}$  hasta  $10^{-6}$  ohm\* cm. Estos valores de resistividad corresponden a materiales semiconductores y metálicos. Para cumplir con esta especificación el medidor de resistividad deberá medir voltajes de  $1 \times 10^1$  hasta  $1 \times 10^{-9}$  volts y corrientes de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes, así como poder aplicar corriente en el mismo o rango.

Debido a que las especificaciones de medición son de alta precisión se permite utilizar instrumentos de laboratorio en el diseño de este medidor de resistividad por 4 puntas colinéales en función de la temperatura.

Por ultimo y muy importante es que la medición de resistividad debe hacerse en forma totalmente automática, es decir por medio de la PC se iniciará un programa que mide la resistividad y posteriormente incrementa la temperatura en forma lineal (razón constante de calentamiento programable) y mida nuevamente la resistividad y así hasta llegar a la

temperatura final del experimento, momento en el cual la PC finalizará la medición de resistividad y guardará los datos en un archivo texto. Los datos a guardar son: tiempo, temperatura, corriente, voltaje, grosor de la muestra y resistividad calculada.

En resumen, las especificaciones que debe cumplir el sistema medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura a diseñar y construir son:

- Medir la resistividad por 4 puntas aplicando el diagrama de flujo de la figura 14.
- Medir la resistividad de un material en función de la temperatura. El rango de medición será de temperatura ambiente a 200 °C.
- Programar diferentes razones de calentamiento para que el comportamiento de la temperatura sea lineal.
- Tener una protección contra las variaciones de temperatura del ambiente.
- Debe medir corrientes del orden de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes.
- Debe medir voltajes del orden de  $1 \times 10^1$  hasta  $1 \times 10^{-9}$  Volts.
- Aplicar corriente DC en el rango de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes.
- Debe graficar la conductividad vs. temperatura y visualizarlo en la pantalla de la PC.
- Salvar los datos en un archivo.dat para un procesamiento posterior, conteniendo: tiempo, temperatura, corriente voltaje, grosor de la muestra y resistividad calculada.

## **VIII. Diseño y construcción del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura**

Para el diseño y construcción del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura se utilizará la metodología siguiente:

Se propondrá un diagrama a bloques tomando en cuenta las especificaciones y el diagrama de flujo de la medición de resistividad. Cada bloque realizará una función específica necesaria en la medición de resistividad 4 puntas en función de la temperatura. Posteriormente se propondrá el circuito eléctrico o instrumento que realice la función especificada en cada bloque. Se construirá y se probará cada bloque. Por ultimo se unirán los bloques para construir el medidor de resistividad de 4 puntas en función de la temperatura.

### **8.1. Diagrama de bloques**

Una vez definido las especificaciones generales de diseño del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura, se procede a la etapa de proponer un diagrama de bloques.

Los diagramas de bloque se utilizan en el diseño de prototipos y circuitos eléctricos porque permiten identificar las tareas y funciones que debe realizar el dispositivo.

De acuerdo a la ecuación 5c las variables a medir son el voltaje inducido  $V$  y la corriente aplicada  $I$ . Otra variable a medir es la temperatura  $T$ . Cabe indicar que los sistemas de medición de resistividad comerciales realizan la medición de resistividad a temperatura ambiente.

Por lo tanto el medidor de resistividad en función de la temperatura debe medir las variables siguientes:

#### Variables

Medir voltaje. V.

Medir corriente. I.

Medir temperatura. T.

y realizar las funciones siguientes:

#### Funciones

Adquirir datos V, I, T.

Aplicar corriente a los electrodos internos del arreglo de 4 puntas.

Arreglo 4 puntas

Controlar temperatura.

Programa de automatización

De acuerdo a lo anterior se propone que cada variable y función tenga su correspondiente bloque. La figura 15 muestra el diagrama a bloques propuesto para realizar el diseño del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 14.

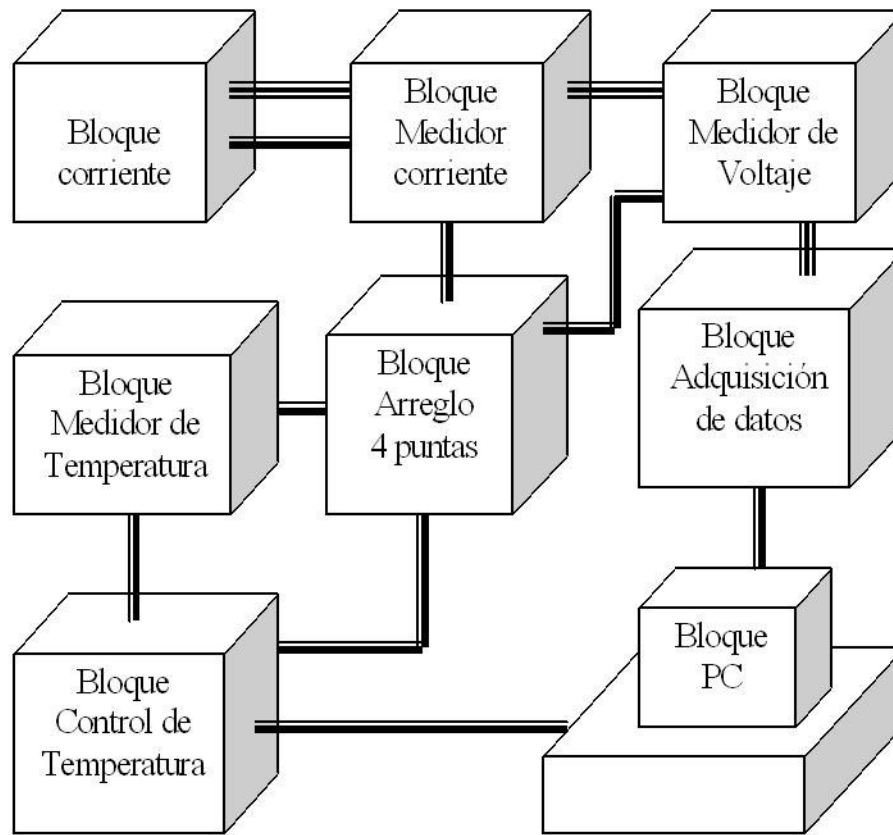


Figura 15. Diagrama a bloques propuesto para el diseño del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura.

## 8.2. Descripción del diagrama a bloques

A continuación se explicará la función o tarea que deberá realizar cada bloque propuesto en el diseño del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura.

**Bloque 4 puntas:** Este bloque corresponde al arreglo de 4 electrodos donde comienza la medición de la resistividad por 4 puntas colinéales. Este bloque definirá como será el arreglo de 4 puntas a construir así como el tipo de resistencia a utilizar. Las especificaciones a cumplir de este bloque son:



- Arreglo de 4 electrodos de acero inoxidable, de plata y de cromo.
- Soporte con resortes para el arreglo de 4 electrodos y para la resistencia.
- Resistencia eléctrica que permita calentar a la muestra hasta un máximo de 200° C.
- Celda protectora del ambiente.

**Bloque medidor de temperatura:** Este bloque corresponde al sensor a utilizar para medir temperatura. La especificación a cumplir es que el sensor de temperatura a utilizar debe medir 200°C como mínimo.

**Bloque de corriente:** Este bloque será el que genere la corriente que vamos a aplicar al material en los electrodos de los extremos, esta corriente será creada por una fuente de voltaje a la cual conectaremos una resistencia en serie para generar dicha corriente. La especificación a cumplir es que deberá aplicar una corriente DC en el rango de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes

**Bloque medidor de corriente:** Este bloque corresponde al medidor de corriente DC que es aplicada a los electrodos externos. La especificación a cumplir es que debe medir corrientes del orden de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes

**Bloque medidor de voltaje:** Este bloque nos dará la medición del voltaje generado por inducción en los electrodos internos. La especificación a cumplir es que debe medir voltajes del orden de  $1 \times 10^1$  hasta  $1 \times 10^{-9}$  Volts.

**Bloque control de temperatura:** Este bloque corresponde al control de temperatura de la resistencia sobre la cual se encuentra el material a medir. La especificación a cumplir es que debe controlar a una temperatura máxima de 200° C y además debe poder controlar la temperatura a una razón constante de calentamiento permitiendo un comportamiento lineal en el incremento de la temperatura de la muestra y de la resistencia de calentamiento.

**Bloque Adquisición de datos:** Este bloque corresponde a la adquisición de las variables V, I y T de los bloques correspondientes, llevando la información a la computadora.

**Bloque PC:** Este bloque esta integrado por una PC, la cual tomará los valores adquiridos de V, I y T y graficará por la pantalla la resistividad en función de la temperatura. Este bloque PC también incorporará al programa de automatización de la medición de resistividad por 4 puntas en función de la temperatura. La especificación a cumplir es que debe graficar y controlar todo el proceso de medición de resistividad por 4 puntas en función de la temperatura.

### **8.3. Implementación eléctrica de cada bloque propuesto**

A continuación se procede a determinar que se utilizará o diseñará para cada bloque en el diagrama de bloques propuesto (Figura 15). Debido a que en el laboratorio se cuenta con instrumentos comerciales como multímetros de banco, así como controladores de temperatura, se pide como una estrategia de diseño que se utilice la infraestructura disponible. Cabe mencionar que ésta estrategia de utilizar instrumentos de laboratorio nos orienta en la forma como podemos implementar eléctricamente cada bloque.

**Implementación eléctrica del Bloque 4 puntas:** Este bloque corresponde al arreglo de 4 electrodos colinéales donde comienza la medición de la resistividad por 4 puntas colinéales. Se construyó un arreglo de 4 puntas colinéales con una base metálica. En la base metálica se puso una resistencia circular de cerámica con un diámetro de 2 1/2 pulgadas y una potencia de 120 Watts (Ver figura 16). La resistencia esta diseñada para que alcance temperaturas de 400° C a plena carga.

Se construyeron 3 arreglos de 4 puntas o electrodos colinéales equidistantes a 2 mm cada punta: Un arreglo utilizando puntas de acero, otro arreglo utilizando puntas de plata y un ultimo arreglo utilizando puntas de cromo equidistantes a 2 mm de cada uno dependiendo del tipo y el grosor del material a medir es que se

recomienda utilizar cada punta (Figura 17). Se construyó un soporte con resortes para sostener el arreglo de 4 puntas colinéales, la función principal de este soporte con resortes es dar una presión constante al poner los 4 electrodos o puntas sobre el material. Por ultimo se utilizó una celda metálica protectora del ambiente construida especialmente para ese propósito en otro trabajo de tesis en la línea de ingeniería industrial. Ver Figura 18. La celda protectora para medición de resistividad consta de un cuerpo cilíndrico con orificios donde se conectan pasamuros los cuales realizan la conexión eléctrica del interior al exterior. Consta de 2 tapas con mirilla de vidrio templado al centro para que el investigador visualice el experimento. También cuenta con espiga para conectar un gas inerte dentro de la celda o bien para conectar vacío (ausencia de oxígeno). La celda tiene sellos de o´ring tanto en las tapas como en los pasamuros y espigas para sellar herméticamente el interior.

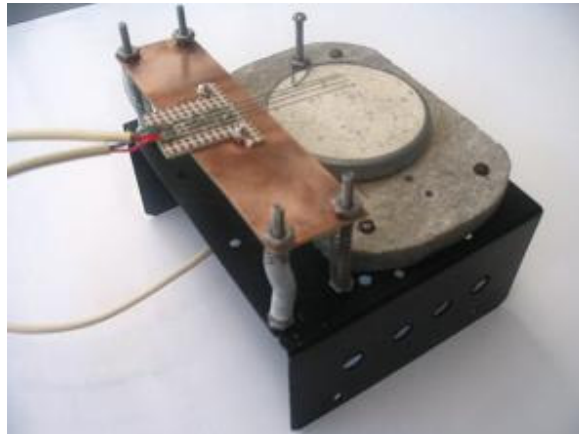


Figura 16. Arreglo de 4 puntas con base metálica.

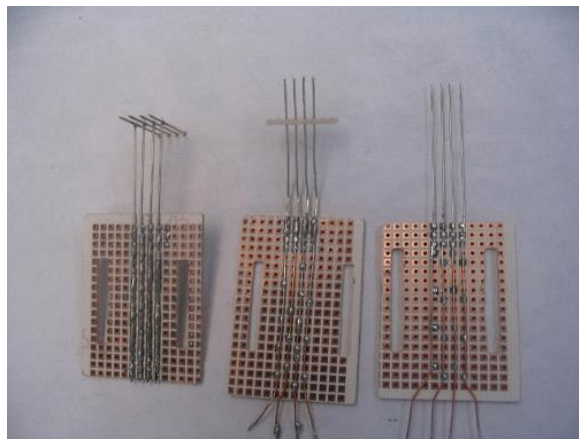


Figura 17. Arreglos de cuatro puntas



Figura 18. Celda protectora para medición de resistividad

### **Implementación eléctrica del bloque medidor de temperatura**

Este bloque corresponde al sensor a utilizar para medir temperatura. La especificación a cumplir es que el sensor de temperatura a utilizar debe medir hasta  $200^{\circ}\text{C}$  como máximo. Existen varias formas de medir la temperatura: por termistor, por termopar y por semiconductor.

Un termistor es un material que varía su resistencia en función de la temperatura su aplicación principal es la medición de temperatura en el rango de  $100^{\circ}$  a  $150^{\circ}$  C como máximo.

Un termopar es la unión de 2 metales diferentes y por efecto Seebeck se genera un potencial entre la unión de los metales que es proporcional a la temperatura. El rango de medición de un termopar va desde  $-50^{\circ}$  C hasta  $1300^{\circ}\text{C}$  existen varias clases de termopares, entre los más comunes podemos mencionar el tipo K, T y J.

Un sensor de temperatura por semiconductor es la unión de materiales p-n (diodo) que generan una corriente de fuga que es proporcional a la temperatura. El rango de medición

de un sensor de temperatura por semiconductor es de  $-50^{\circ}$  hasta  $150^{\circ}$  C. El CI mas comúnmente usado para medir temperatura es el LM35.

De acuerdo a lo anterior y a cumpliendo con la especificación se optó por utilizar a un termopar como sensor de temperatura principalmente porque permite medir en el rango de temperatura de trabajo de hasta  $200^{\circ}$  C.

### **Implementación eléctrica del bloque de corriente**

Este bloque será el que proporcione la corriente que vamos a aplicar al material en los electrodos de los extremos, esta corriente será creada por una fuente de voltaje a la cual conectaremos una resistencia en serie para generar dicha corriente. La especificación a cumplir es que deberá aplicar una corriente DC en el rango de  $1 \times 10^{-2}$  hasta  $1 \times 10^{-6}$  Amperes.

De acuerdo a la especificación de suministrar 1 micro ampere a una resistencia en serie de 10 Kohms se necesitará un voltaje aplicado de  $V = R \cdot I = 1 \times 10^4 \text{ ohms} \cdot 1 \times 10^{-6} \text{ Ampere} = 0.01 \text{ Volts}$ . Por lo tanto se necesita una fuente de voltaje que proporcione como mínimo un voltaje de 0.01 Volts. Por otro lado se requiere que esta fuente de voltaje pueda ser controlada automáticamente para que al iniciar una medición pueda ser posible aplicar una corriente que el usuario introdujo desde la PC. Entonces se requiere una fuente de voltaje que pueda comunicarse con la PC y que tenga como mínimo voltaje 0.01 Volt. Se optó por implementar este bloque con una fuente de voltaje marca Agilent Modelo E3644A. Esta fuente tiene comunicación GPIB, puerto serie, resolución de 0.01 Volt y voltaje máximo de 20 VDC. Ver figura 19. Las especificaciones técnicas de esta fuente de voltaje se proporcionan en el anexo B.



Figura 19. Fuente de Voltaje Agilent HP 3644A.

### **Implementación eléctrica del Bloque medidor de corriente**

Debido a que una especificación a cumplir para este bloque es que pueda medir corrientes de hasta un micro ampere se optó por implementar eléctricamente este bloque con un multímetro digital Agilent Modelo 34401A de 6½ dígitos con punto flotante y una resolución de 1 micro ampere, este dispositivo tiene gran flexibilidad en sistema de comunicación ya que cuenta con la interfaz GPIB (IEEE-488), así también como la interfaz RS-232. Utiliza lenguajes de programación estándar como son: SCPI, C++, LabView (ver figura 20). Las especificaciones técnicas de esta fuente de voltaje se proporcionan en el anexo B.

Cabe mencionar que el hecho de utilizar un instrumento de laboratorio nos permite cumplir con la especificación de medir como mínimo un micro ampere DC, y además por el hecho de que tiene comunicación GPIB también permitirá la comunicación con la PC fácilmente además de que el instrumento entrega el dato de corriente en formato ASCII listo para procesarse en un programa.



Figura 20. Multímetro digital Agilent Modelo 34401A

### Implementación eléctrica del Bloque medidor de voltaje

Este bloque nos dará la medición del voltaje generado por inducción en los electrodos internos. La especificación a cumplir es que debe medir voltajes del orden de  $1 \times 10^1$  hasta  $1 \times 10^{-9}$  Volts. El valor tan chico en voltaje es posible cuando se mide material metálico. Debido a que medir 1 o 10 nano volts no es una tarea trivial se optó por utilizar un instrumento comercial denominado Nano Volt/Micro Ohm Meter Marca Agilent Modelo 34420A de  $7\frac{1}{2}$  dígitos, con gran flexibilidad en sistemas de interfaz ya que cuenta con la interfaz GPIB (IEEE-488) y serie RS 232. La comunicación GPIB se utiliza para programar al multímetro y para adquirir el valor del voltaje de 8 dígitos con punto flotante, así también como la interfaz RS-232. Utiliza lenguajes de programación estándar como son: SCPI y compatibilidad Keithley 181, C++, LabView. Este dispositivo tiene dos canales de entrada y diferentes funciones para medidas de voltajes. Así como también construye operaciones matemáticas incluyendo Termistor, Termocupla y RTD para medidas de temperatura (ver figura 21).



Figura 21. Nano Volt/Micro Ohm Meter Agilent.

### Implementación eléctrica del Bloque control de temperatura

Este bloque corresponde al control de temperatura de la resistencia sobre la cual se encuentra el material a medir. La especificación a cumplir es que debe controlar a una temperatura máxima de 200° C y además debe poder controlar la temperatura a una razón constante de calentamiento permitiendo un comportamiento lineal en el incremento de la temperatura de la muestra y de la resistencia de calentamiento. También este bloque deberá soportar como sensor de temperatura a un termopar tipo K.

Este módulo se construyó utilizando un controlador programable de temperatura Marca Watlow Modelo 381 con comunicación serie (Ver figura 22). La comunicación serie se utiliza para programar al controlador con un perfil de temperatura desde la PC. La resolución del controlador de temperatura es de 1°C y el sensor de temperatura es un termopar tipo K. El rango de temperatura será de ambiente a 200°C. El controlador a utilizar puede medir desde -50° C hasta 1300° C que es el rango de medición del termopar tipo K. Sin embargo solo mediremos hasta 200° C.





Figura 22. Controlador Programable de temperatura Watlow.

Este controlador ofrece la opción de controlar la razón de calentamiento constante por medio de programar 2 parámetros:

Rate: se introduce la razón de calentamiento deseada por ejemplo  $5^{\circ} \text{C} / \text{min}$ .

Setpoint: el valor de la temperatura a la que se desea llegar.

Con estos dos parámetros el controlador calcula la potencia y el tiempo que tardará en llegar desde la temperatura ambiente de inicio hasta la temperatura final con la razón de calentamiento deseada. Este controlador acepta 11 diversos tipos del termopar, RTD o entradas de proceso escalable.

En adición al controlador también se utilizara un modulo de potencia que dará la energía necesaria para calentar a la resistencia. Recordemos que el controlador solo da la señal de control, pero no la potencia, por ello se debe utilizar una etapa de potencia. Para este controlador se utilizo como modulo de potencia el relevador de estado sólido WATLOW DA10-24F0-0200, el cual pude manejar corrientes de hasta 16 Amperes a 240 VAC.

La conexión entre el controlador y el relevador de estado sólido utilizado se muestra en la figura 23.

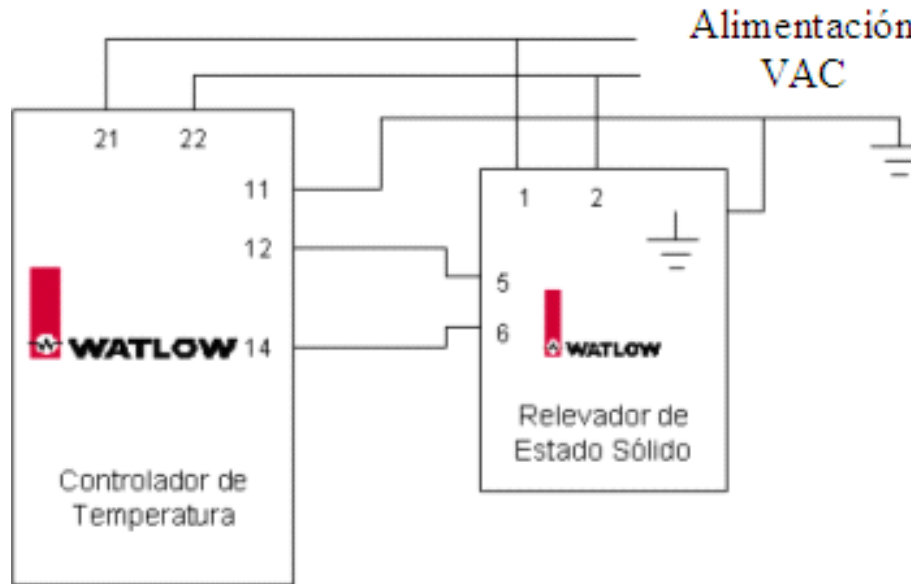


Figura 23. Diagrama de conexión entre el controlador de temperatura y el relevador de estado sólido.

### Implementación eléctrica del bloque Adquisición de datos

Este modulo consiste en la comunicación con la PC para la adquisición, graficado y salvado de datos. Los datos a adquirir son Voltaje V, Corriente I y Temperatura T. Debido a que los instrumentos utilizados cuentan con comunicación GPIB (ver figura 24), se decidió utilizar para la implementación eléctrica de este bloque una tarjeta de comunicación PCI- GPIB 488 Marca Agilent. Ver Figura 4. Esta tarjeta nos permite comunicarnos con 16 instrumentos diferentes y adquirir sus datos en formato ASCII. Para el caso del controlador de temperatura, se hizo la comunicación y el control por medio de comunicación serial RS-232 con la PC [9]. El puerto serie utilizado es COM1 que es estándar en cualquier computadora de escritorio. Para realizar la comunicación física entre los instrumentos y la tarjeta se utilizaron cables especiales para comunicación GPIB. La figura 25 muestra la conexión física entre instrumentos y entre la computadora.



Figura 24. Cable de conexión GPIB

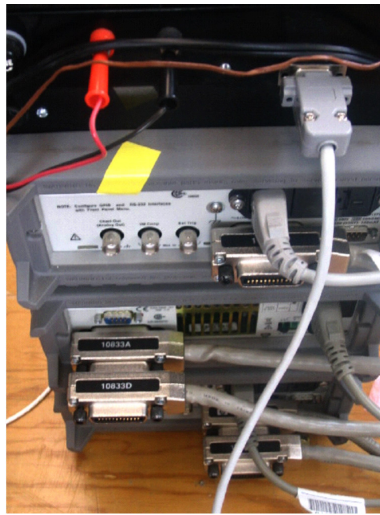


Figura 25. Conexiones entre los instrumentos

### Implementación eléctrica del Bloque PC

Este bloque está integrado por una PC, la cual pedirá por medio de la tarjeta PCI-GPIB los valores de V e I de los instrumentos utilizados. Y por medio del puerto serie adquirirá el valor de temperatura del controlador de temperatura Watlow. Una vez adquiridos los datos V, I, y T graficará por la pantalla la resistividad en función de la temperatura. Este bloque PC también incorporará al programa de automatización de la medición de resistividad por 4 puntas en función de la temperatura.

El lenguaje de computadora a utilizar es LabVIEW porque permite una comunicación vía GPIB con diferentes instrumentos además de que las compañías de esos instrumentos

proporcionan los drivers específicos para LabVIEW. También LabVIEW tiene protocolo de comunicación por puerto serie, lo cual se utilizó para programar al controlador de temperatura y adquirir el valor de temperatura de la medición. Algo importante es que a pesar de que LabVIEW es un lenguaje grafico es posible aplicar la formula de resistividad dentro de su estructura de programación.

### **Construcción del Medidor de resistividad en función de la temperatura**

Habiéndose realizado la implementación eléctrica de cada bloque se procede a unir todos los bloques para construir el medidor de resistividad en función de la temperatura. La figura 26 muestra el medidor de resistividad en función de la temperatura construido. En este momento el medidor puede realizar mediciones de resistividad en forma manual (sin necesidad de utilizar la computadora). Por lo tanto el siguiente paso es realizar la automatización de la medición de resistividad. La automatización se refiere principalmente a hacer un programa por computadora que haga cada paso en la medición de resistividad en función de la temperatura en forma automática.

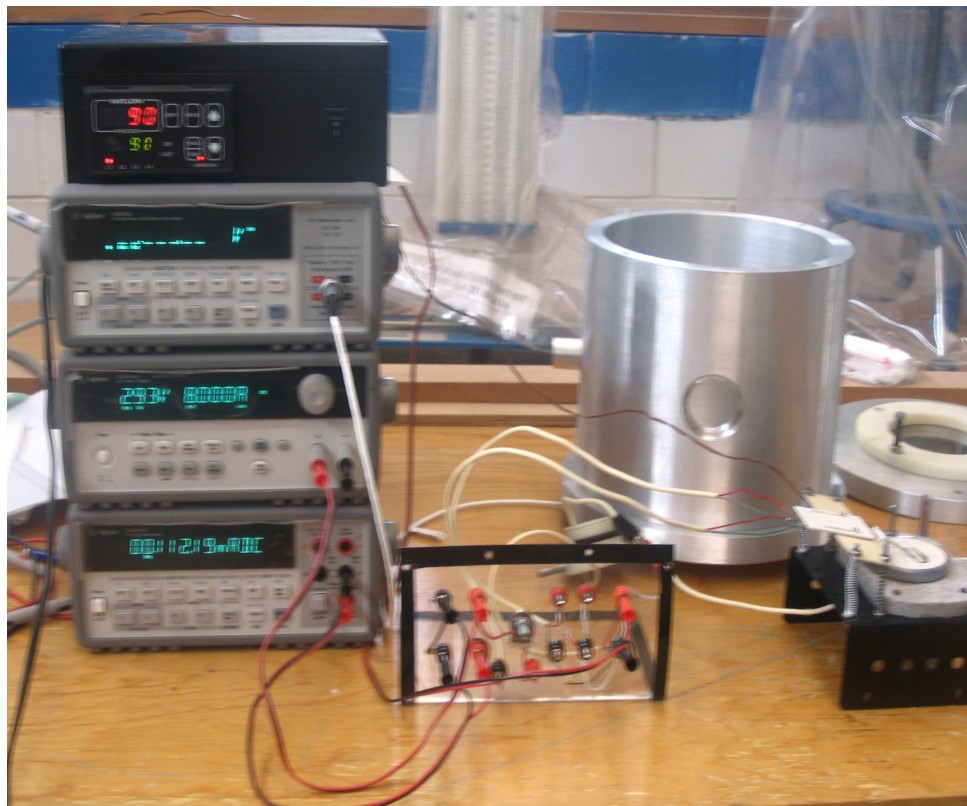


Figura 26. Medidor de resistividad en función de la temperatura.

## **IX Automatización del medidor de resistividad.**

### **9.1. Introducción**

La automatización del medidor de resistividad por la técnica de 4 puntas colinéales en función de la temperatura se refiere principalmente a hacer un programa por computadora que controle, adquiera y calcule la resistividad en función de la temperatura en un período determinado. La metodología para desarrollar este programa de automatización es por programación modular y consiste en:

Desarrollar pequeños programas que realicen la función de cada bloque que conforma al medidor de resistividad en función de la temperatura.

Unir los programas de cada bloque para formar el programa principal de automatización.

Por lo tanto tomando como base los bloques de que consta el medidor de resistividad en función de la temperatura podemos definir las funciones siguientes para desarrollar pequeños programas para cada función de bloque y posteriormente unir los programas para obtener el programa de automatización completo:

Funciones a realizar automáticamente:

- Medición de corriente.
- Ajuste de corriente automático.
- Medición de voltaje.
- Medición de temperatura.
- Calculo matemático de resistividad y resistencia.
- Programación de temperatura.

Cada uno de estos programas nos dará un resultado el cual lo manipularemos de forma que al conjuntarlos en un solo programa nos proporcione la medición automatizada de resistividad en función de la temperatura.

## 9.2. Desarrollo de la programación

A continuación se reporta el desarrollo de diferentes programas para la automatización del medidor de resistividad.

### Programa medidor de corriente

Este programa realizará la medición de la corriente tres veces y obtendrá el promedio de las tres mediciones, para ello usamos el multímetro Agilent 34401A. Este cálculo es necesario para saber cual es la corriente que estamos aplicando a los electrodos o puntas externas del medidor de resistividad de 4 puntas.

Para poder realizar este programa que nos proporcione la medición de corriente usamos los siguientes materiales: Fuente de Voltaje Agilent E3644A, Multímetro Agilent 34401A, Tarjeta GPIB, Cable de conexión GPIB, Software LabView 7.1, Resistencia limitadora.

El figura 27 muestra el diagrama de flujo para la realización del programa que necesitamos.

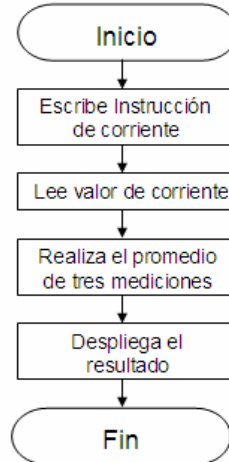


Figura 27. Diagrama de flujo de medición de corriente.

Partiendo del diagrama de flujo anterior se procede a desarrollar en el lenguaje de programación LabView. La figura 28 muestra el programa desarrollado en LabView. Como se puede observar el programa utiliza drivers VISA para el manejo de la comunicación GPIB. El flujo para lectura es: Abrir el puerto GPIB (Icono O), escribir el comando GPIB (Icono W), leer el ASCII que manda el instrumento

(icono R) y por ultimo cerrar el puerto GPIB.

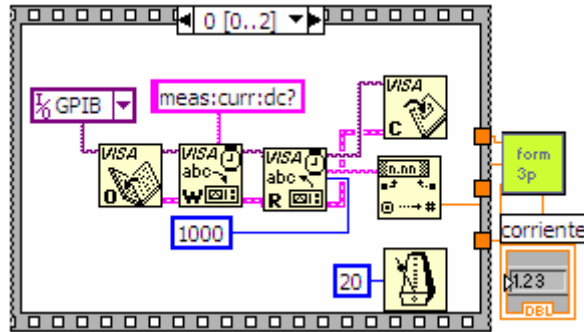


Figura 28. Programa desarrollado para Medición de corriente.

Las funciones que utilizamos para hacer el programa medidor de corriente serán descritas en el anexo A.

### Programa Controlador de Corriente

El siguiente programa controlara el valor de corriente que se desee, para ello lo primero que hará el programa será pedir al usuario el valor de la corriente que se desee, después el programa escribirá un valor de voltaje de 0.01 volts.

Posteriormente se medirá el voltaje y la corriente que se tenga en ese momento, los valores obtenidos los introduciremos en una fórmula, la cual calculará un valor de resistencia, con ese valor de resistencia calcularemos un voltaje que la fuente aplicará, y así obtendremos el valor de corriente deseada.

Para realizar este programa usamos los siguientes materiales: Fuente de Voltaje Agilent E3644A, Tarjeta GPIB, Cable de conexión GPIB, Software LabView, multímetro Agilent 34401A. Resistencia limitadora.

En el diagrama de flujo se muestran los pasos que se tienen que seguir para la realización de este programa. Ver figura 29.



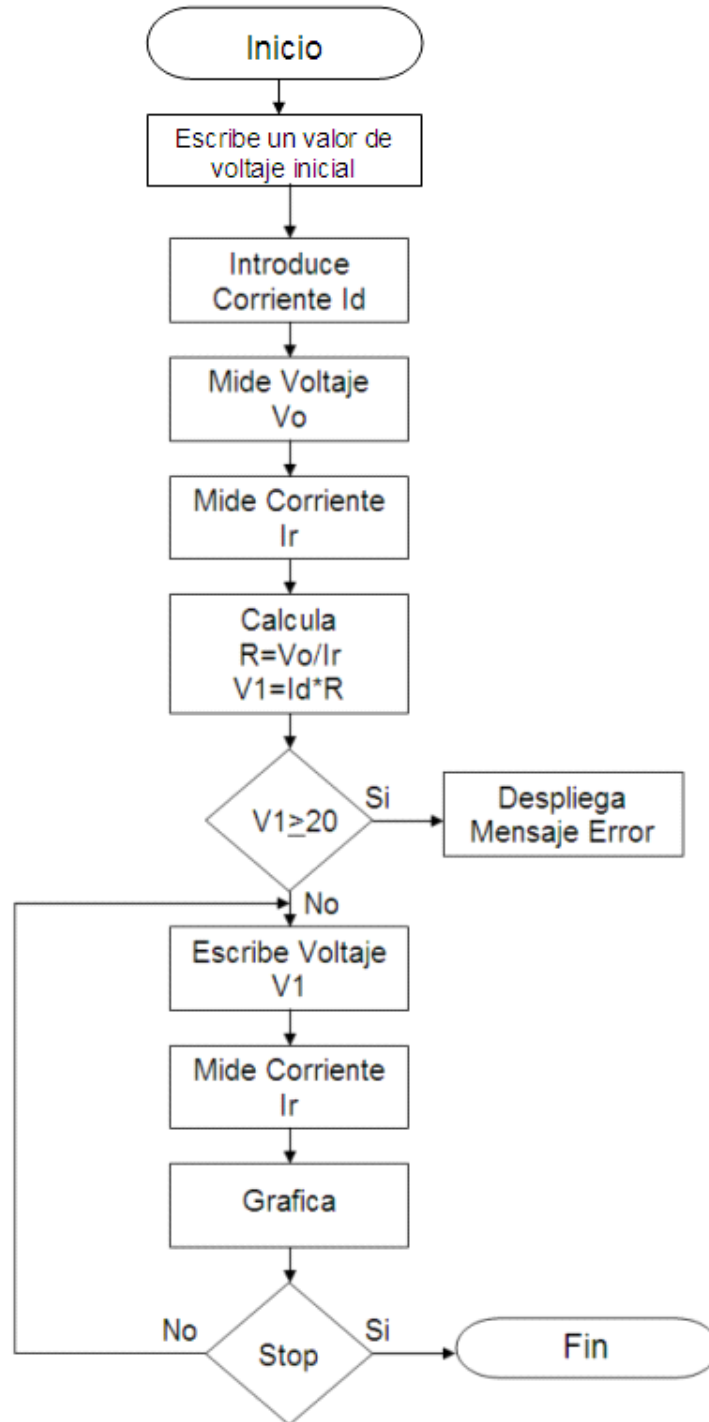


Figura 29. Diagrama de flujo de Control de corriente.

La figura 30 representa el diagrama a bloques del programa, el cual construiremos a partir de las diferentes funciones que se encuentran en la plataforma LabView.



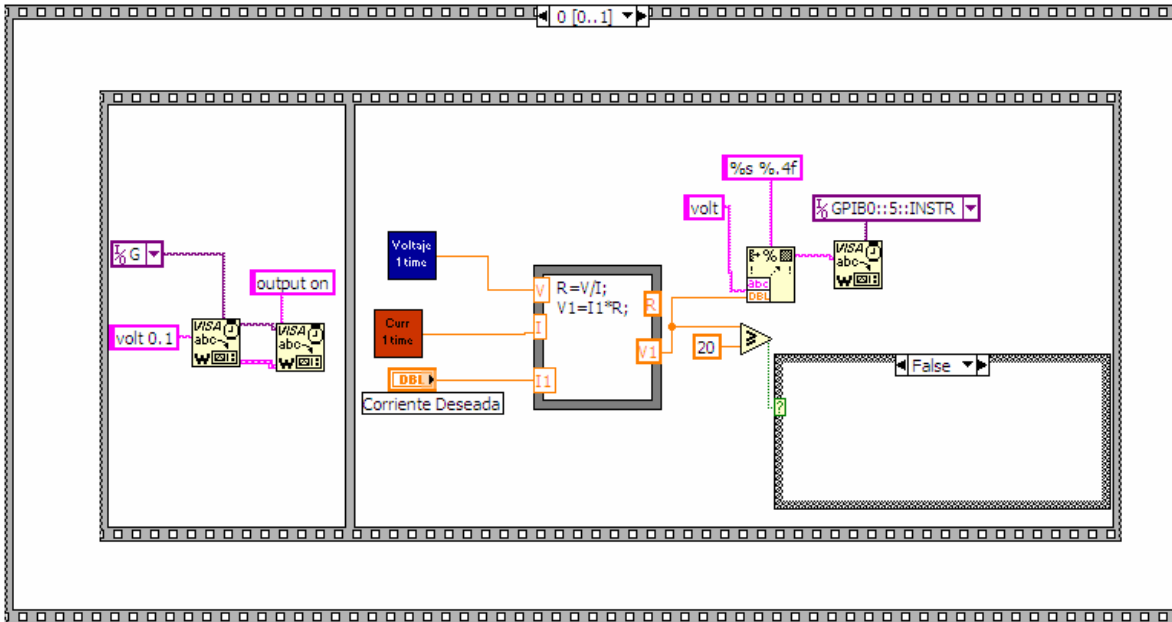


Figura 30. Diagrama a bloques de Control de corriente

Las funciones que se utilizaron para realizar el programa medidor de corriente se describen en el anexo A.

### Programa Medidor de Voltaje

Este programa realizará la medición de voltaje tres veces y hará el promedio de las tres mediciones, para ello usamos el NanoVolt/Micro Ohm Meter Agilent 34420A, la medición la haremos en la puntas interiores del medidor de resistividad de 4 puntas, ya que será el voltaje inducido por la corriente que le apliquemos a las puntas exteriores del medidor de resistividad, este voltaje inducido a medir es del orden de los nanovolts.

El siguiente diagrama de flujo nos dará un panorama de seguimiento para la realización del programa que necesitamos. Ver figura 31.

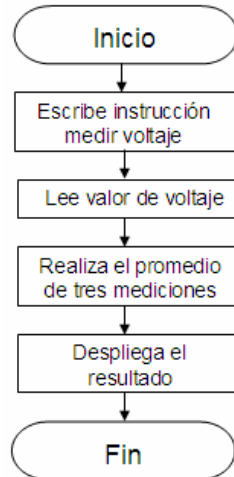


Figura 31. Diagrama de flujo de Medición de voltaje.

Teniendo ya el diagrama de flujo, se procederá a la construcción del programa en la plataforma LabView.

La figura 32 representa el diagrama a bloques del programa, el cual construimos a partir de las diferentes funciones que se encuentran en LabView.

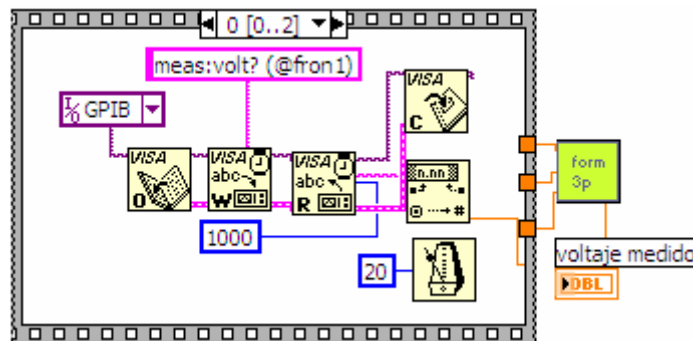


Figura 32. Diagrama a bloques de Medición de voltaje.

Las funciones que utilizamos para hacer el programa medidor de corriente serán descritas en el anexo A.

## Programa Medición de Temperatura

Este programa hará la medición de temperatura y graficará los datos obtenidos de esta manera el usuario podrá visualizar la variación de temperatura a razón del tiempo. Para esto

utilizamos el sistema construido a partir de un controlador de temperatura, un relevador de estado sólido marca Watlow y un termopar tipo K. Los datos serán adquiridos a través de la interfaz RS-232.

Para hacer el programa nos auxiliaremos del siguiente diagrama de flujo el cual nos explica como hacer la medición de temperatura.

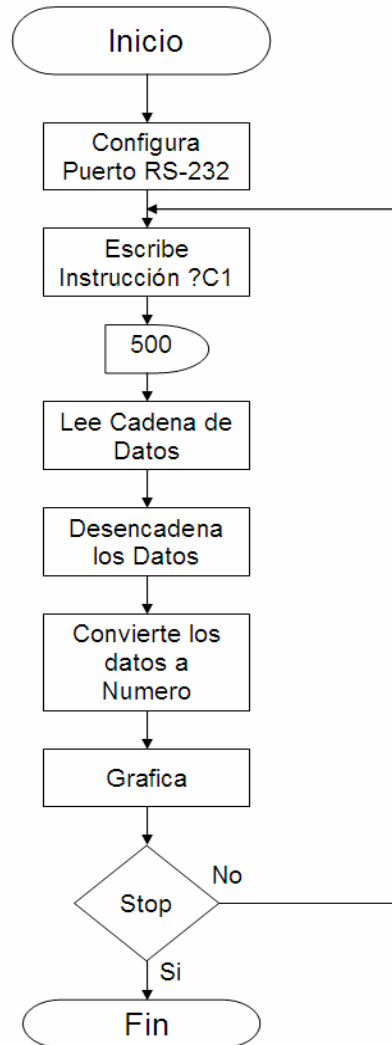


Figura 33. Diagrama de flujo de Medición de temperatura.

El siguiente diagrama a bloques nos muestra de manera detallada como esta integrado el programa para realizar la medición de temperatura, como adquirir los datos de la interfaz RS-232 y procesar estos datos. Ver figura 34.

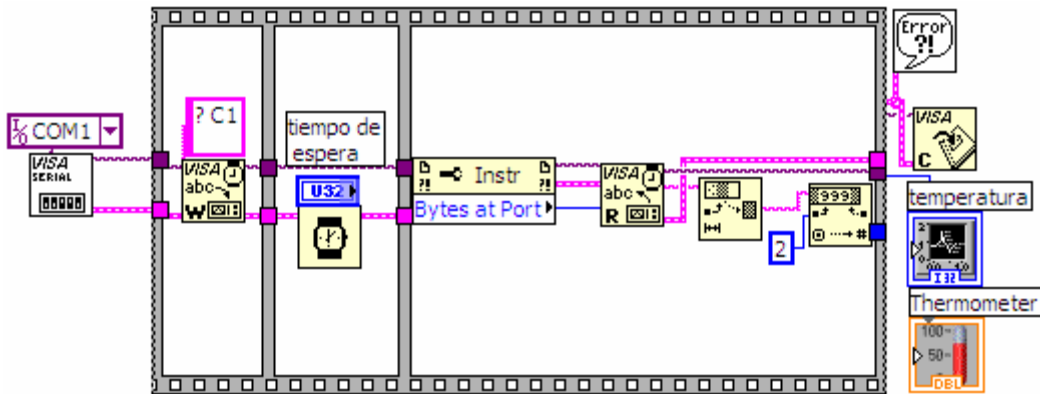


Figura 34. Diagrama a bloques de Medición de Temperatura

Las características de los elementos y como son usados en este programa están descritos con mas detalle en el anexo A.

### Programa Fórmula de Resistividad

Este programa lo usamos para calcular la resistividad del material a caracterizar, para ello los resultados obtenidos de los programas anteriores como son corriente y voltaje medido los aplicaremos a la fórmula y así conseguir el resultado de resistividad.

Con el siguiente diagrama de flujo podremos construir a partir de las distintas funciones que nos proporciona el entorno de programación la fórmula para calculará la resistividad del material. Ver figura 35.

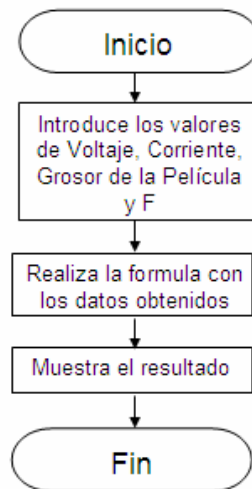


Figura 35. Diagrama de flujo Formula de Resistividad.

En el fórmula node creamos tres variables de entrada una variable de corriente, una variable de voltaje y una variable grosor de película, ésta última variable se mostrará en el panel frontal para poder cambiarla manualmente. También tendrá una variable de salida que será la resistividad calculada. Ver figura 36.

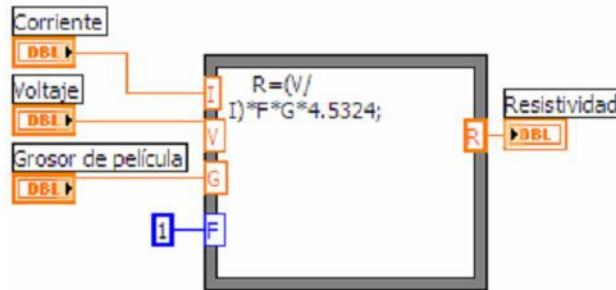


Figura 36. Diagrama a bloques Fórmula de Resistividad.

### Programa Fórmula Promedio

El programa fórmula promedio lo usamos para promediar tres mediciones que hicimos con el instrumento, ya que al hacer la medición encontramos que el resultado varía.

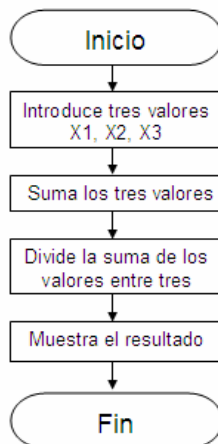


Figura 37. Diagrama de flujo Fórmula Promedio.

Haciendo lo descrito con anterioridad nuestro fórmula node resulta de la siguiente manera, en este nodo creamos tres variables de entrada X1, X2 y X3, que serán los voltajes medidos y una variable de salida Z que será el promedio de los tres voltajes. Ver figura 38.

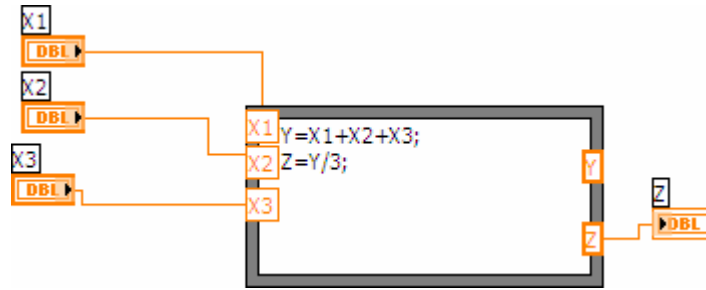


Figura 38. Diagrama a bloques Fórmula Promedio.

### Programa Programación de la temperatura

El siguiente programa (Ver figura 39) está diseñado para poder programar al controlador de temperatura desde el programa principal. Para ello se programarán tres parámetros: temperatura de inicio, temperatura máxima y rate (numero de grados centígrados por minuto).

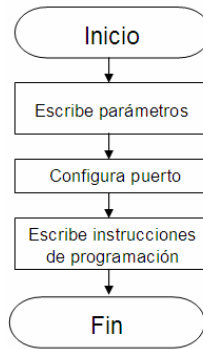


Figura 39. Diagrama de flujo de Programación

El programa se ejecutará cuando el usuario lo desee desde el panel frontal con solo presionar el botón de ejecutar programa, los rango para la temperatura máxima son de 0-400°C y el rate de 0-200°C/min.

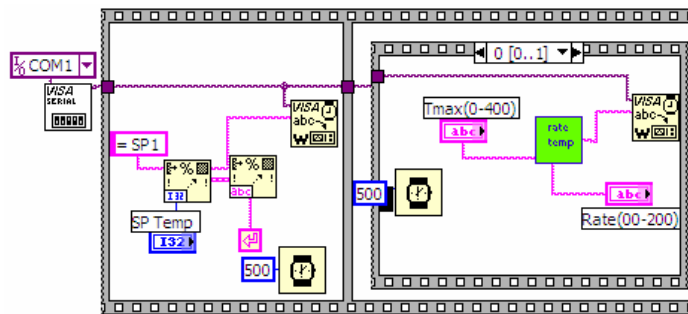


Figura 40. Diagrama a bloques Programación de la temperatura

### 9.3. Programa Medidor de Resistividad (unión de los programas anteriores)

El siguiente programa es la unión de los programas hechos con anterioridad, este programa calculará la resistividad de un material en función de la temperatura, lo primero que hará el programa será controlar la corriente deseada. Posteriormente pedirá el nombre del archivo a guardar y después medirá la temperatura, el voltaje y la corriente, con estos datos calculará la resistividad del material por medio de una fórmula y la resistencia. También graficará temperatura/tiempo, resistividad/tiempo, resistividad/temperatura, y guardará estos datos en el archivo especificado.

Para poder calcular la resistividad del material necesitamos los siguientes instrumentos: Fuente de Voltaje Agilent E3644A, Tarjeta GPIB, Cable de conexión GPIB, Software LabView 7.1, multímetro Agilent 34401A, Nanovoltmetro 34420A, Resistencia limitadora, controlador de temperatura Watlow, arreglo de 4 puntas. El siguiente diagrama de flujo muestra como está diseñado el programa y las acciones que deberá seguir. Ver figura 41.

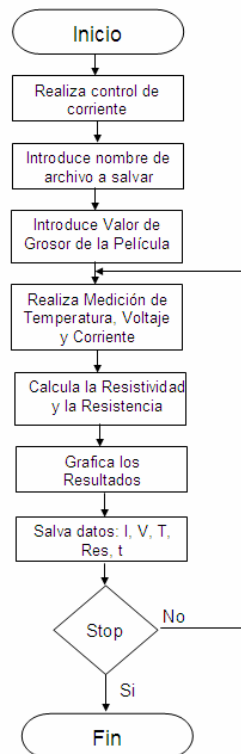


Figura 41. Diagrama de flujo Fórmula de Resistividad.

La figura siguiente muestra el diagrama para la construcción del arreglo encargado para proporcionar la medida de resistividad, el cual integra los dispositivos mencionados anteriormente en los materiales.

Los programas hechos con anterioridad son mostrados en el diagrama a bloques en forma de SUB VIs. Para poder crear un SUB VI seleccionaremos en el diagrama a bloques la partes que queremos que contenga el SUB VI después en la barra de herramientas hacemos click en edit y posteriormente en la opción CREATE SUB VI, después hay que editar el icono para saber la función que realiza éste SUB VI.

Nuestro programa medidor de resistividad consta de dos tramas, la primera realiza el control de corriente, y la segunda que realiza el cálculo de resistividad. La figura 42 muestra ésta primer trama del programa medidor de resistividad.

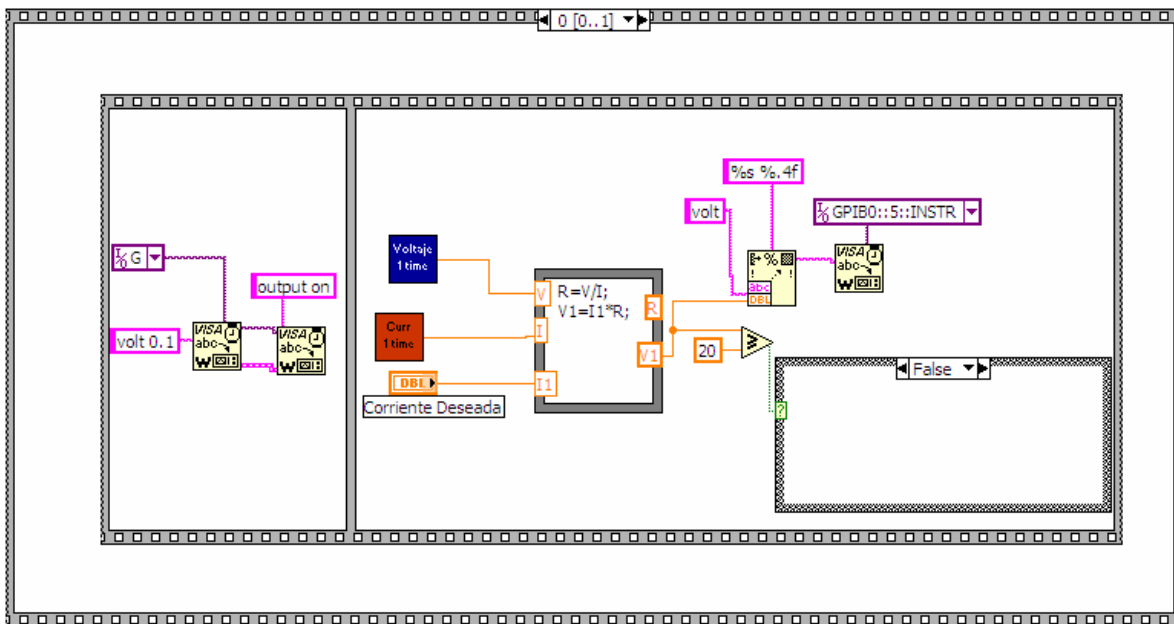


Figura 42. Diagrama a bloques Medidor de Resistividad (primer trama).

La segunda trama nos ayudará a realizar el calculo de resistividad, para ello utilizaremos SUB VI, ya que usando estos es mas fácil la conjunción del programa. Cada uno de estos SUB VI esta hecho con los programas mencionados con anterioridad. La figura 43 muestra el diagrama a bloques de la segunda trama del programa medidor de resistividad.



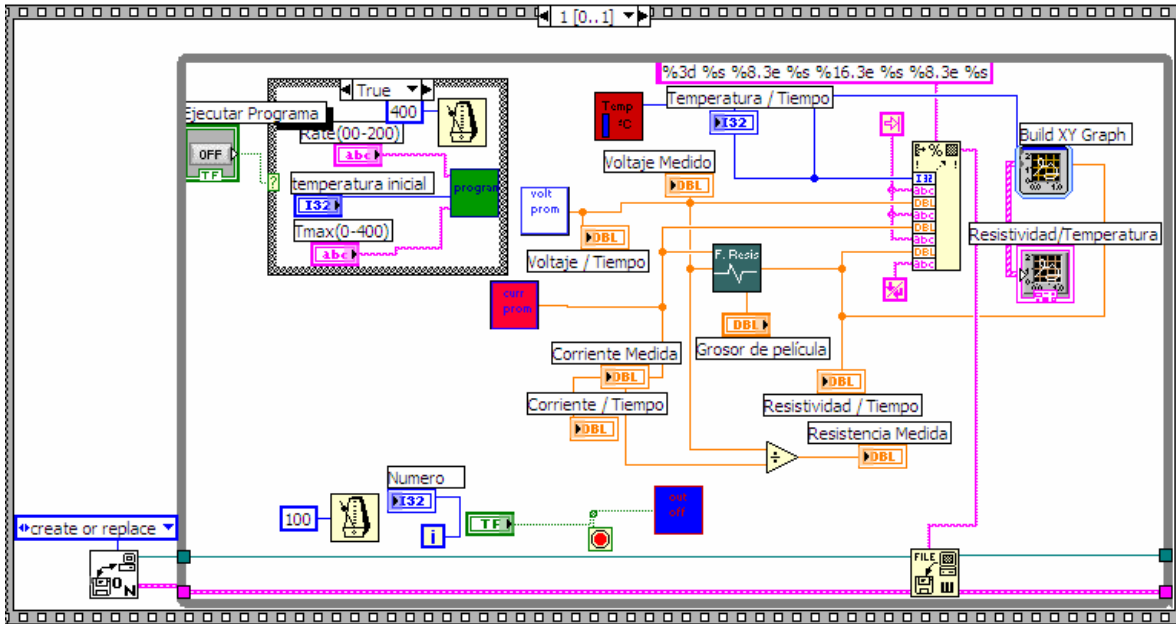


Figura 43. Diagrama a bloques Medidor de Resistividad (segunda trama).

Cada uno de los SUB VI tiene una función la cual será indispensable para hacer la medición de la resistividad, ya que cada valor obtenido es aplicado a la fórmula, la cual calculará el valor de resistividad. Cada SUB VI es descrito a continuación de acuerdo a la función que tiene en el programa medidor de resistividad.



Este SUBVI realizará la medición de temperatura y la graficará en un Chart mostrando las variaciones de temperatura y el tiempo de adquisición.



Con el SUB VI de volt promedio leeremos el voltaje obtenido del nanovoltmetro/microohmetro, el cual hará la medición tres veces y por medio de una fórmula calcularemos el promedio de las tres mediciones.



Con el SUB VI de curr promedio leeremos la corriente obtenida del multímetro Agilent, haremos la medición de corriente tres veces y haremos el promedio de éstas.



Por medio de éste SUB VI que es una fórmula que solo suma las tres mediciones obtenidas y las divide entre tres para poder obtener el promedio. Para hacer esta operación utilizaremos el fórmula node.



Con el SUB VI de F. Resis calcularemos la resistividad del material por medio de una fórmula.



Con éste SUB VI programaremos al controlador de temperatura con lo cual programaremos tres parámetros: Temperatura de inicio, temperatura máxima y número de grados centígrados por minuto.



Este SUB VI lo utilizaremos para apagar la fuente de voltaje cuando presionemos el botón de stop

## PANEL FRONTAL

En el panel frontal se mostraran tres gráficas en las cuales se mostraran las mediciones y cálculos realizados como son: temperatura/tiempo, Resistividad/tiempo y Resistividad/temperatura. También en el panel frontal se mostrarán los indicadores de corriente medida, voltaje medido, resistencia medida, resistividad, temperatura y el número de muestras que se han hecho hasta el momento, además tendrá un control, el cual será para cambiar el grosor de la película y un botón de stop para que cuando el usuario lo requiera el programa finalice. La figura 44 muestra el panel frontal del programa.

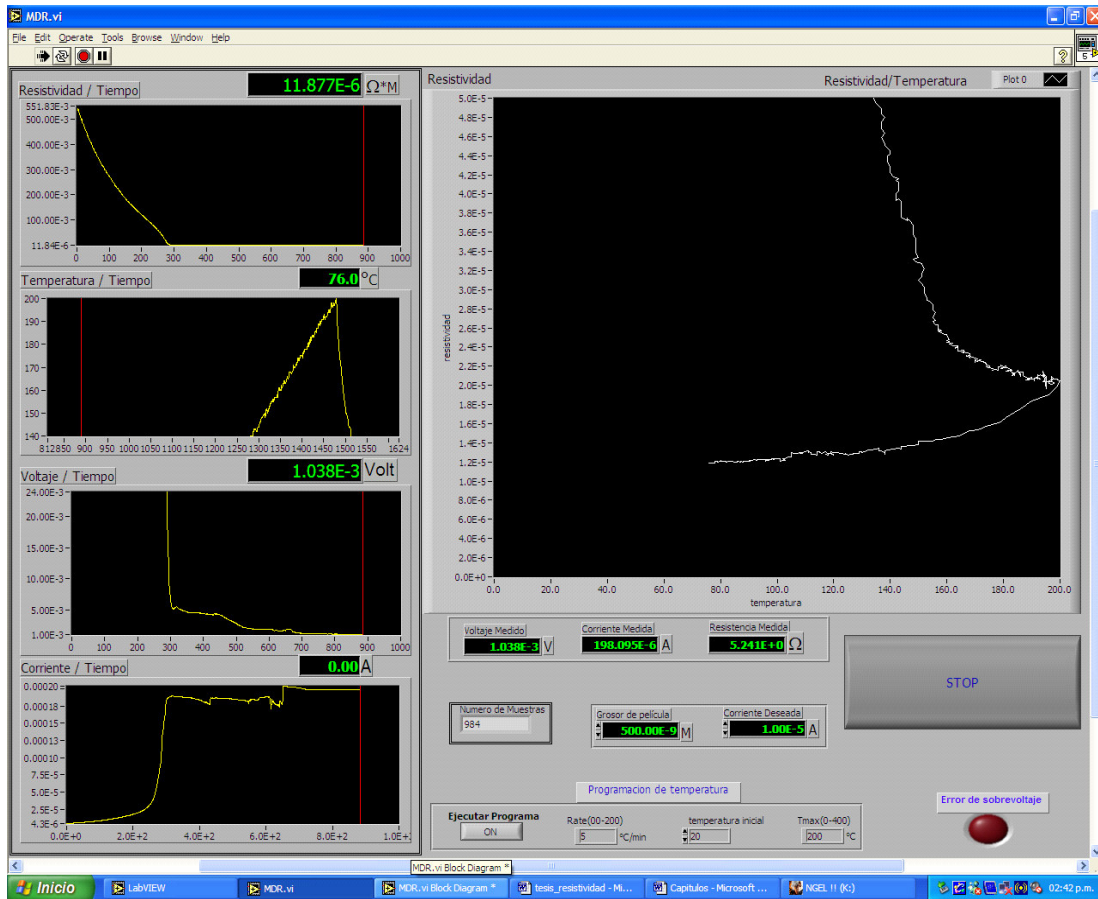


Figura 44. Pantalla del panel frontal al hacer la medición de resistividad.

También nos muestra diferentes gráficas como son:

- Gráfica de voltaje/tiempo.
- Gráfica de corriente/tiempo.
- Gráfica de temperatura/tiempo.
- Gráfica de resistividad/tiempo.
- Gráfica de resistividad/temperatura.

La pantalla también nos muestra controles para la configuración de la temperatura como son:

- Control de temperatura máxima.
- Control de temperatura de inicio.
- Control de rate (°C/min).

## X. Prueba del medidor de resistividad

### 10.1. Introducción

Se realizará una prueba del medidor de resistividad construido y automatizado haciendo una medición de la resistividad en función de la temperatura. Se realizará la medición de resistividad de una película delgada de GeSbTe [7] desde temperatura ambiente hasta 200°C con una razón constante de calentamiento de 5°C por minuto. Como la medición de resistividad depende de las condiciones de medición externas se realizarán 2 mediciones de resistividad: una con una celda protectora y otra sin una celda protectora.

### 10.2. Arreglo del medidor de resistividad utilizado para las pruebas

La figura 45 muestra el arreglo total del medidor de resistividad construido con una celda protectora. Se puede observar que el medidor de resistividad consiste principalmente en 4 dispositivos electrónicos controlados por computadora y que miden el valor de resistividad a cada instante de tiempo y lo grafica por computadora. El programa por computadora permite variar los parámetros de la medición de resistividad. Una vez que el experimento acaba la computadora salva los datos en un archivo especial que puede ser utilizado para su posterior procesamiento. La figura 46 muestra la pantalla del programa que se utilizó para hacer las mediciones de resistividad.

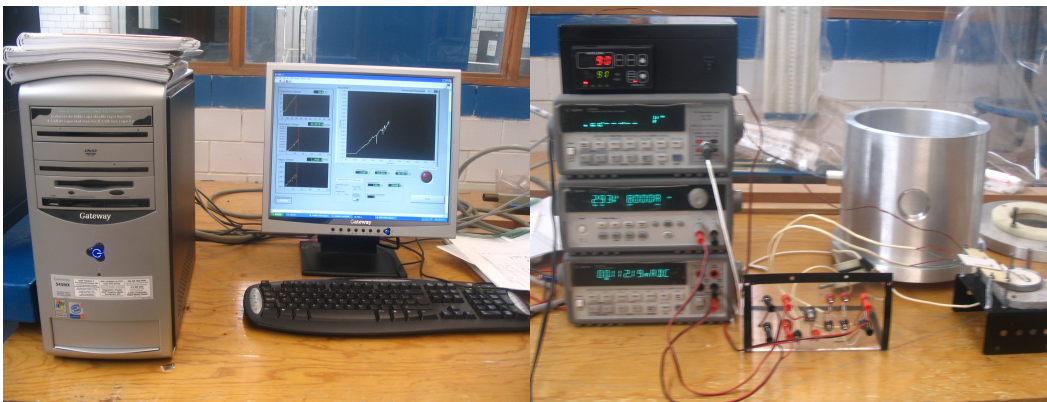


Figura 45. Arreglo total del medidor de resistividad construido con una celda protectora

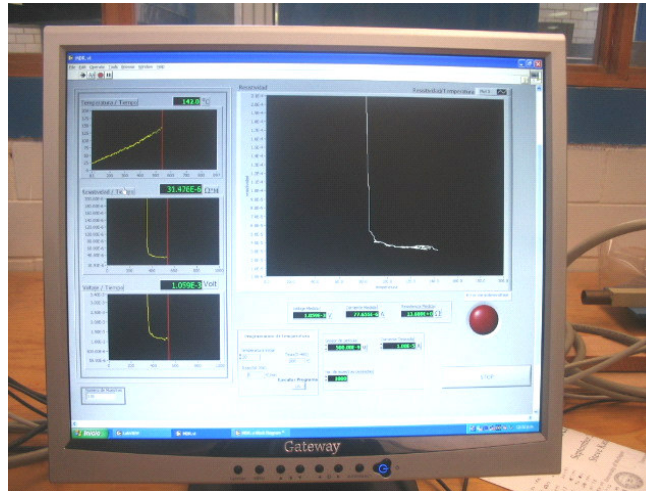


Figura 46. Programa utilizado para realizar la medición de resistividad por PC.

### 10.2.1. Prueba de resistividad a una muestra de GeSbTe sin celda protectora.

Se depositó una película delgada de GeSbTe (aproximadamente de 1 micrómetro de grosor) sobre vidrio corning [11]. Se tomó una muestra de 2cms x0.5 cms para medir su resistividad. Se colocó en el arreglo de 4 puntas y se aplicó 10 micro amperes de corriente a la muestra. La figura 45 muestra el arreglo para la medición

La figura 46 muestra la gráfica de resistividad contra temperatura obtenida. Obsérvese las variaciones en la temperatura ocasionando que la medición de resistividad sea muy ruidosa. Esto es debido a que como no se tiene la celda protectora la medición de temperatura esta fluctuando de acuerdo a los cambios del ambiente ya sea por ráfagas de aire o bien por aire generado al acercarse caminando (ver figura 47). Cabe hacer notar que mientras más alto sea el valor temperatura mas variaciones en la medición de temperatura se tiene y por lo tanto en la medición de resistividad. Ver figura 48



Figura 47. Arreglo utilizado para la medición de resistividad sin celda protectora

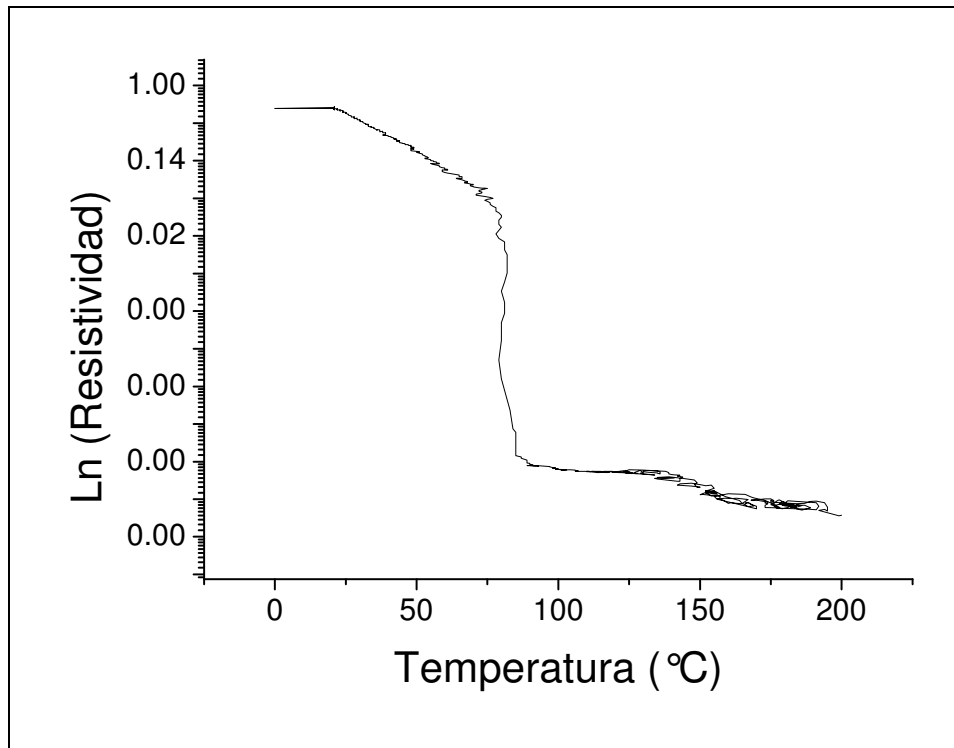


Figura 48. Gráfica de una medición de resistividad contra temperatura de una película delgada de GeSbTe sin utilizar la celda de protección construida.



## 10.2.2. Prueba de resistividad a una muestra de GeSbTe con celda protectora.

Se procede a medir la misma muestra de película delgada de GeSbTe pero ahora con el arreglo de 4 puntas dentro de la celda protectora construida. La figura 49 muestra el arreglo utilizado para la medición de resistividad.

La figura 50 muestra la gráfica de resistividad contra temperatura. Se observa que la temperatura varía linealmente sin tener fluctuaciones. Por lo tanto la gráfica de resistividad también presenta menos fluctuaciones resultando en una medición de resistividad sin ruido.

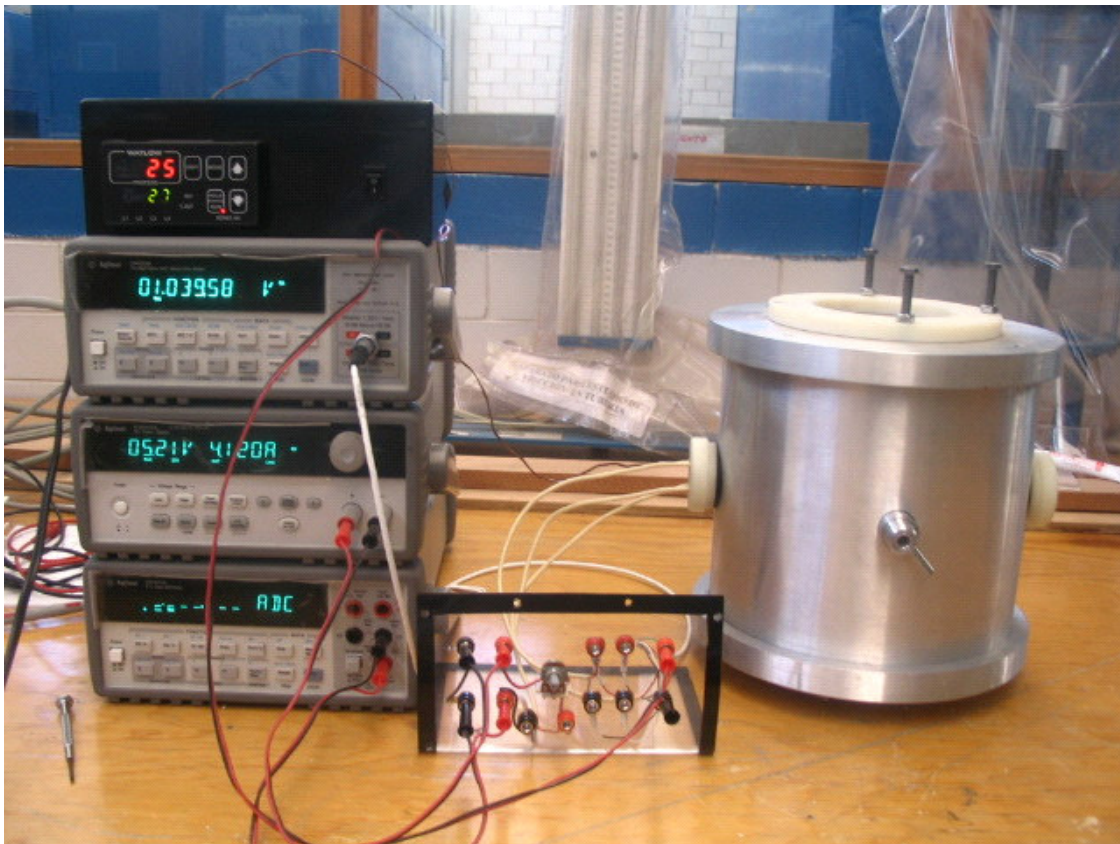


Figura 49. Arreglo utilizado para la medición de resistividad con celda protectora

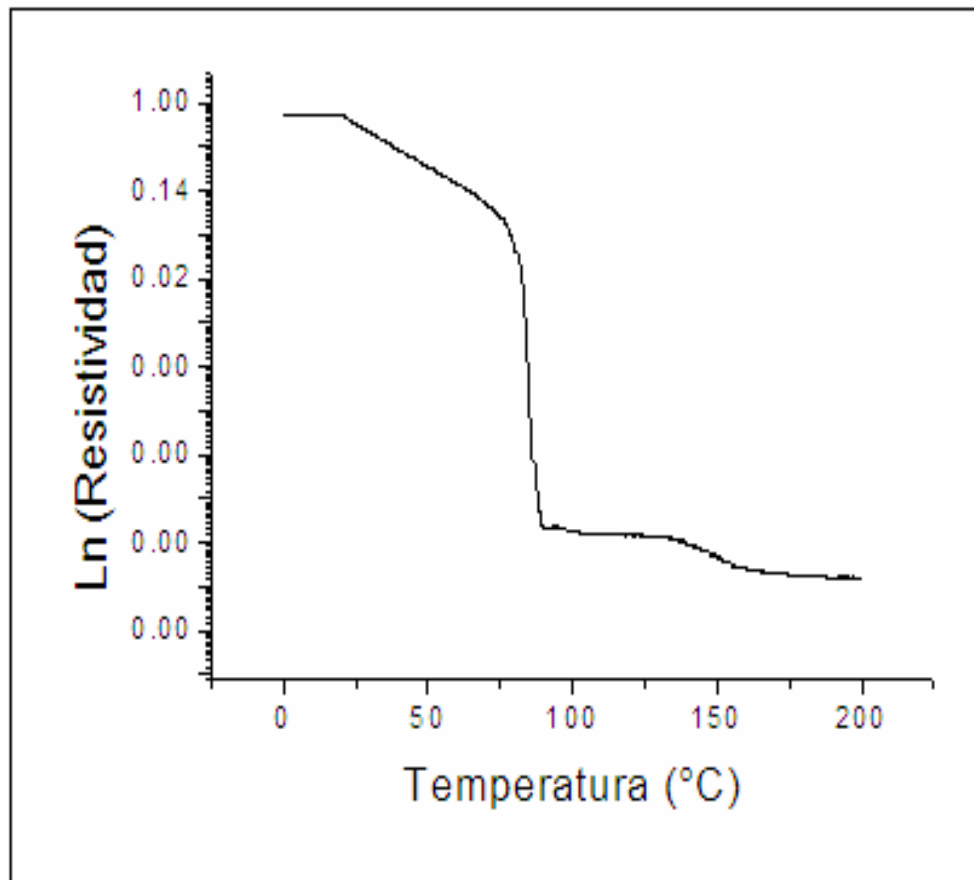


Figura 50. Gráfica de una medición de resistividad contra temperatura de una película delgada de GeSbTe utilizando la celda de protección construida.

Ahora procedemos a comparar las mediciones realizadas de resistividad. La figura 51 muestra las dos gráficas de resistividad contra temperatura obtenidas. Se puede observar que la medición de resistividad realizada con la celda protectora presenta un menor ruido y una gráfica mas limpia en el valor de resistividad [12]. Con esto, se demuestra que la celda protectora funcionó adecuadamente y que las especificaciones de diseño se cumplieron. La medición de resistividad se realizó hasta 200° C, se pudo observar el experimento por las mirillas de vidrio, las fluctuaciones del ambiente ya no afectaron a la medición de resistividad.



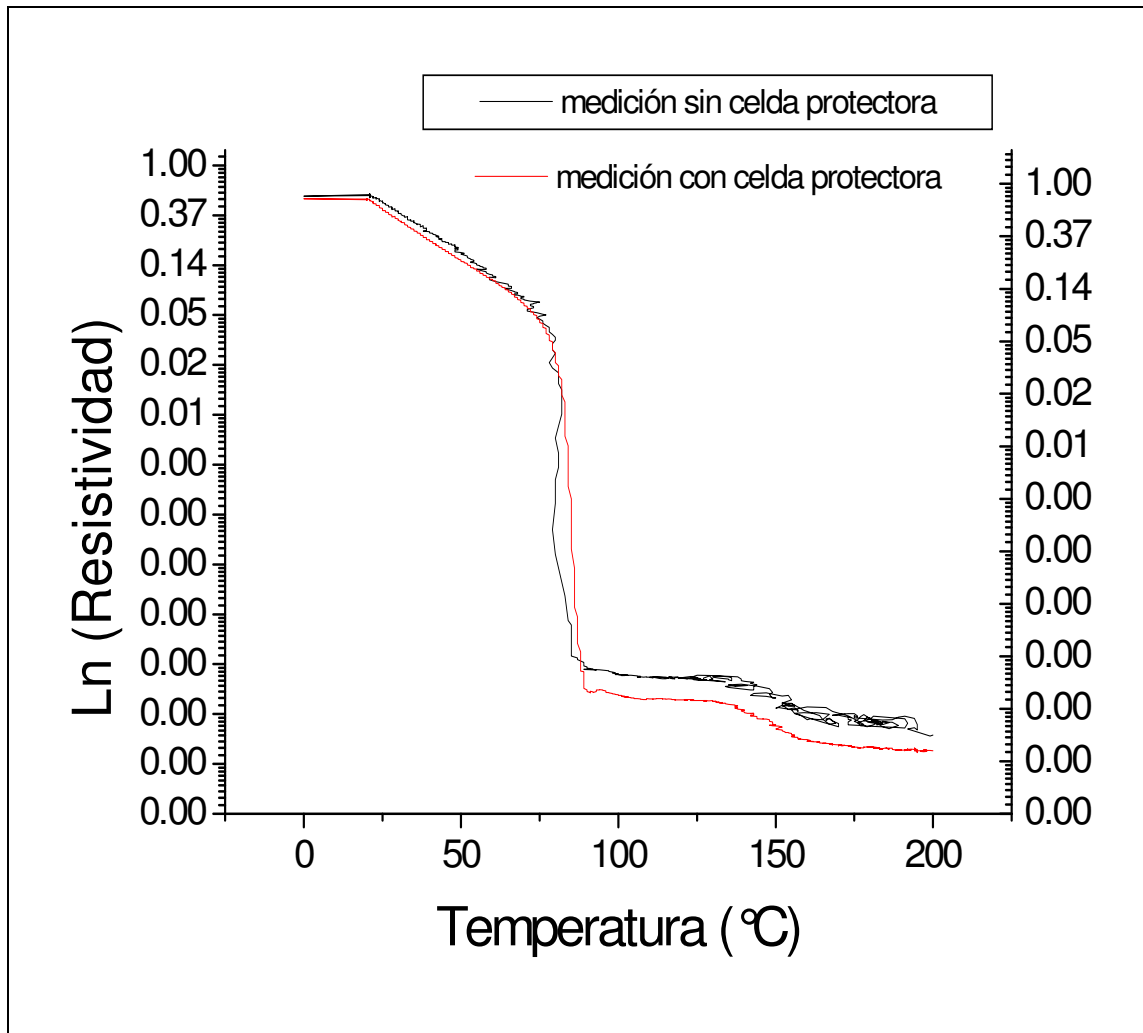


Figura 51. Comparación de la medición de resistividad contra temperatura con y sin celda protectora construida.

## **XI. Conclusión**

Se logró el diseño, construcción y automatización de un medidor de resistividad por cuatro puntas para películas delgadas y materiales en general. Se aprovechó la comunicación GPIB 488 y la comunicación serial para la automatización del sistema construido. El medidor de resistividad consta principalmente de un multímetro, un nanovoltmetro, una fuente de voltaje y un controlador de temperatura. Se aprovechó la versatilidad de LabVIEW para manejar los diferentes protocolos de comunicación de instrumentos como GPIB-488 y puerto serial.

El programa desarrollado genera una pantalla la cual consta de 5 gráficas: una gráfica de temperatura contra tiempo, otra gráfica de resistividad contra tiempo, una gráfica de voltaje vs tiempo y otra de corriente vs tiempo y una ultima gráfica de resistividad contra temperatura. El programa desarrollado también permite la captura por teclado del grosor de la película y el guardado de los datos en un archivo apropiado. El medidor de resistividad construido y automatizado fue probado en la medición de resistividad de una película delgada de GeSbTe en su composición 124, obteniéndose la curva típica de resistividad para este tipo de material.

Procesando los datos obtenidos se podrá determinar la energía de activación de la conductividad el cual es un parámetro importante para determinar la banda prohibida de conducción de un material semiconductor intrínseco. Este dispositivo también es útil para realizar mediciones de resistividad en materiales SMD pero para ello es necesario cambiar el arreglo de 4 puntas a un arreglo de 2 puntas.

## XII. Referencias y Bibliografía

- [1] Mott NF, Davis EA. Electronic Processes in Non-Crystal-Line Materials. Oxford: Clarendon Press, 1978.
- [2] Electricidad y conductividad. Internet: [www.principia-malaga.com](http://www.principia-malaga.com)
- [3] Formulas y corriente ohm P. G. Hewitt, Física conceptual, Addison Wesley– Longman, segunda edición, 1998.
- [4] L. E. Folivi y A. Godman, Física, Voluntad–Logman, segunda edición, 1977.
- [5] Wieder H.H, Laboratory notes on electrical and galvanomagnetic measurements. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979, p. 12.
- [6] Propiedades de los materiales. Internet: <http://www.uclm.es/profesorado/maarranz/Documentos>
- [7] E. Morales-Sánchez, E. Prokhorov, J. González-Hernández, Yu. Voroviev, J. Horta Rangel, S. Kostylev Effects of contacts on the electrical characterization of amorphous chalcogenide alloys. Vacuum 70 (2003) 483.
- [8] Protocolo GPIB. Internet. NI. <http://www.ni.com.mx>
- [9] Protocolo RS-232. Internet. NI. <http://www.ni.com.mx>
- [10] Manual de LabView. Internet. NI. <http://www.ni.com.mx>
- [11] E. Morales Sánchez, E. Prokhorov et al. Structural, electric and kinetic parameters of ternary alloys of GeSbTe. Thin Solid Films. 471 (2005) pp. 243-247.

[12] E. Morales Sánchez, N. Hernández Romero, G. Pérez Lechuga, J. Rojas Ramírez, M. González Hernández, JCS. Touh Mora. Medición de resistividad en películas delgadas. Memorias Congreso Nacional SOMI XXS 2005. León, Guanajuato, México. 24 al 28 de Octubre 2005.

## Anexo A

### Programación

#### Programa principal

Para poder realizar este programa principal que hace la medición de resistividad nos auxiliamos de varios SUB VIs, cada uno realiza una función específica dentro del programa y a continuación los describiremos.

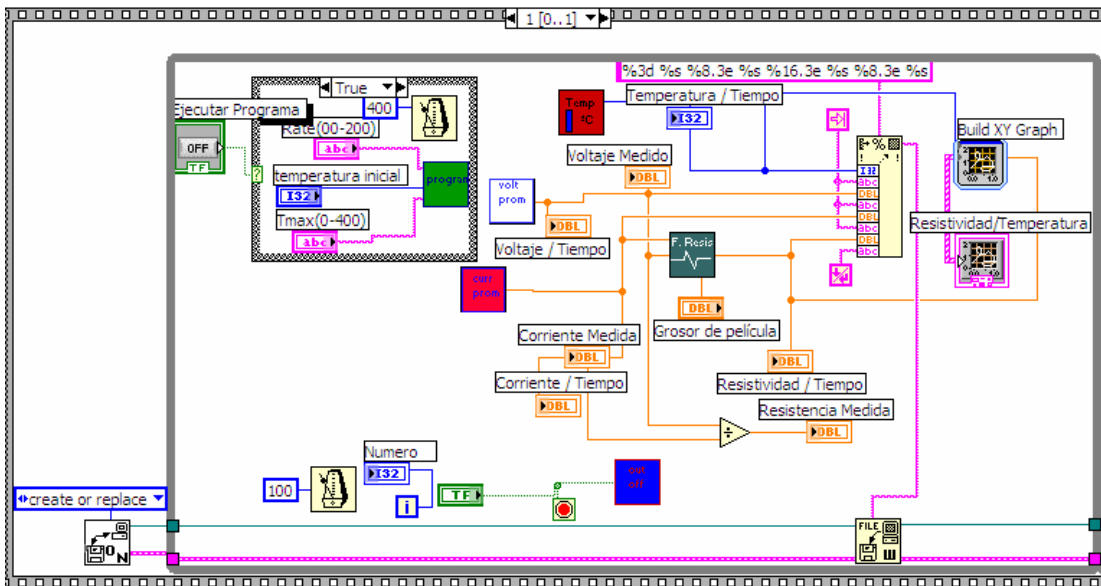
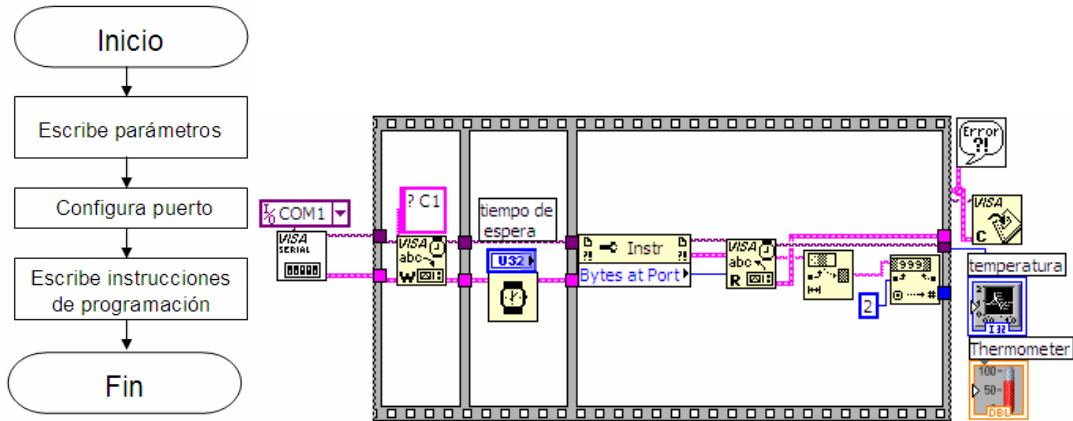


Diagrama a bloques Medidor de Resistividad

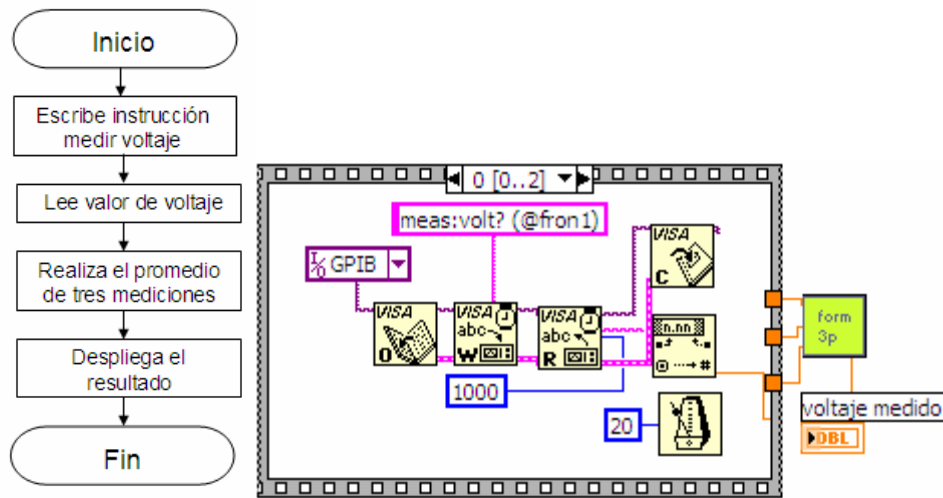


Este SUBVI realizará la medición de temperatura y la graficará en un Chart mostrando las variaciones de temperatura y el tiempo de adquisición.



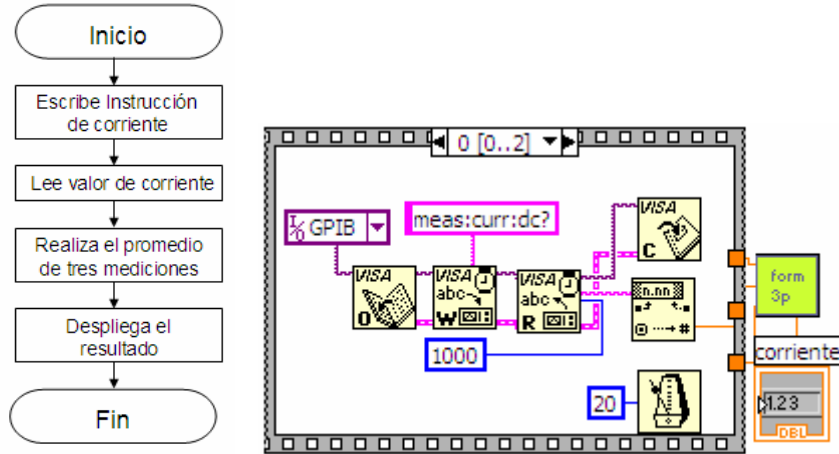
volt prom

Con el SUB VI de volt promedio leeremos el voltaje obtenido del nanovoltmetro/microohmetro, el cual hará la medición tres veces y por medio de una fórmula calcularemos el promedio de las tres mediciones.

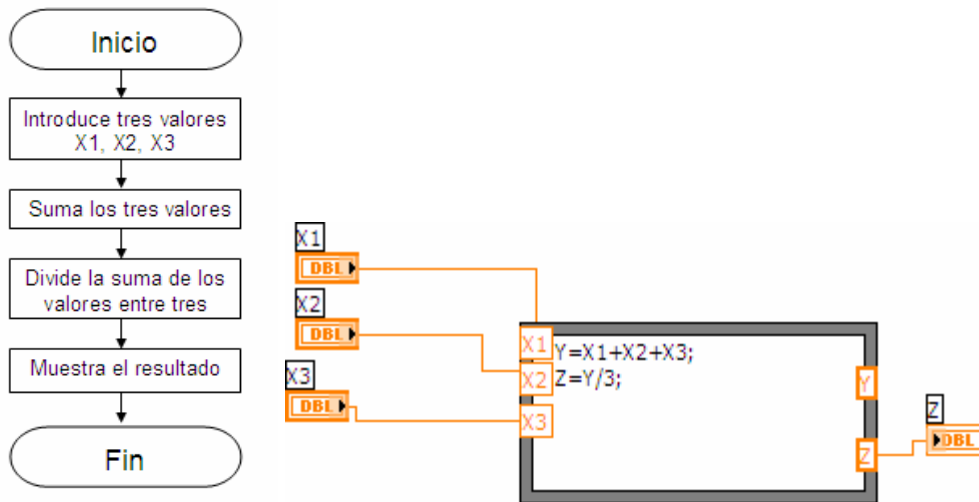


curr prom

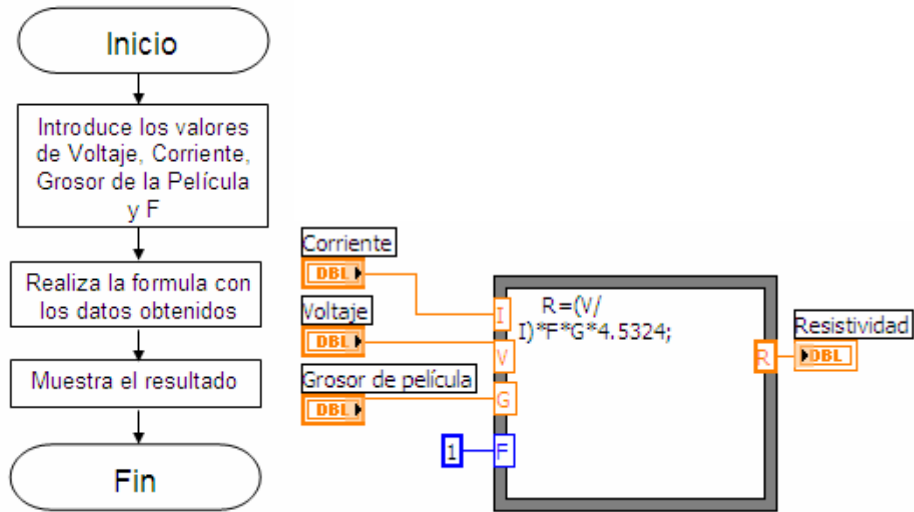
Con el SUB VI de curr prom leeremos la corriente obtenida del multímetro Agilent, haremos la medición de corriente tres veces y se calculará el promedio de éstas.



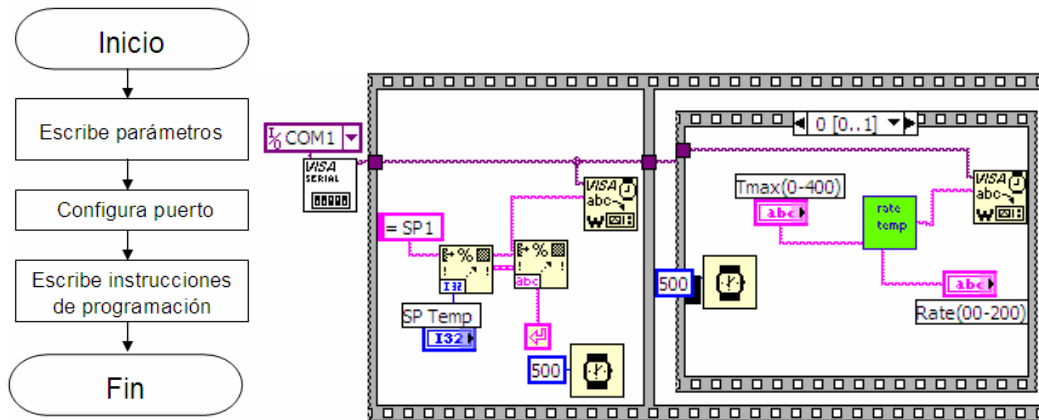
Por medio de este SUB VI que es una fórmula que solo suma las tres mediciones obtenidas y las divide entre tres para poder obtener el promedio. Para hacer esta operación utilizaremos el formula node.



Con el SUB VI de F. Resis calcularemos la resistividad del material por medio de una fórmula.



Con este SUB VI programaremos al controlador de temperatura con lo cual programaremos tres parámetros: temperatura de inicio, temperatura máxima y número de grados centígrados por minuto.





## Anexo B

### Especificaciones técnicas de los instrumentos

#### a) Multímetro Agilent 34401A



#### Funcionamiento Superior

El multímetro 34401A de Agilent le da el funcionamiento que usted necesita rápidamente, el banco exacto y la prueba del sistema. El multímetro proporciona una combinación de la resolución, de la exactitud y de la velocidad. Cuenta con 6 1/2-dígitos de resolución, una exactitud básica del 0.0015% y 1.000 lecturas/segundo.

Las funciones asociadas comúnmente a la operación del banco, como continuidad y prueba del diodo, se construyen adentro. Otras capacidades como lecturas de min/max/avg y medidas directas del DB y del dBm hacen la comprobación con el 34401A más rápida y más fácil. El 34401A le da la capacidad de almacenar hasta 512 lecturas en memoria interna.

<b>Operating Characteristics <sup>[4]</sup></b>		
<b>Function</b>	<b>Digits</b>	<b>Readings/s</b>
dcV, dcl, and Resistance	6½	0.6 (0.5)
	6½	6 (5)
	5½	60 (50)
	5½	300
	4½	1000
acV, acI	6½	0.15 slow (3 Hz)
	6½	1 medium (20 Hz)
	6½	10 fast (200 Hz)
	6½	50 <sup>[5]</sup>
Frequency or period	6½	1
	5½	9.8
	4½	80

Utilícelo para la prueba de los sistemas

Para el uso de los sistemas, el 34401A le da un rendimiento de procesamiento más rápido de la interfaz que cualquier otro DMM en su clase. El 34401A puede enviar hasta 1.000 lecturas/segundo directamente a través del bus GPIB en formato ASCII. Se proporcionan las señales completas y externas del voltímetro del disparador así que usted puede sincronizar a otros instrumentos en su sistema de la prueba. Además, una salida de la TTL indica resultados de error de prueba cuando se utiliza la prueba de límite. Para asegurar la compatibilidad el multímetro 34401A incluye tres lenguas de mando (SCPI, Agilent 3478A y platija 8840A /42A), así que usted no tiene que reescribir su software existente de la prueba.

<b>Measurement Characteristics</b>
<b>dc voltage</b>
Measurement method: Continuously integrating multi-slope III A-D converter
A-D linearity: 0.0002% of reading + 0.0001% of range
Input resistance: 10 MΩ or 0.1 V, 1 V, 10 V ranges: Selectable > 10,000 MΩ
100 V, 1000 V ranges: 10 MΩ ± 1%
Input bias current: < 30 pA at 25° C
Input protection: 1000 V all ranges
dcV:dcV ratio accuracy: $V_{input} Accuracy + V_{reference} Accuracy$

Las cualidades comúnmente alcanzadas, tales como funciones, las gamas, y la resolución se seleccionan con solo presionar el botón. Las características avanzadas están disponibles con las funciones del menú que le dejan optimizar el 34401A para sus usos. El software incluido de Agilent IntuiLink permite que usted ponga sus datos capturados para trabajar fácilmente, en programas de PC tales como Microsoft Excel® o Word® para analizar, interpretar, exhibir, imprimir, y documentar los datos que usted consigue del 34401A.

Function	Range <sup>(1)</sup>	Frequency, etc.	24 hour <sup>(2)</sup> 23°C ± 1°C	90 day 23°C ± 5°C	1 year 23°C ± 5°C	Temperature coefficient 0°C – 18°C 28°C – 55°C
dc voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	<b>10.00000 V</b>		<b>0.0015 + 0.0004</b>	<b>0.0020 + 0.0005</b>	<b>0.0035 + 0.0005</b>	<b>0.0005 + 0.0001</b>
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
True rms ac voltage <sup>(4)</sup>	100.0000 mV	3 Hz - 5 Hz	1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004
		5 Hz - 10 Hz	0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004
		10 Hz - 20 kHz	0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004
		20 kHz - 50 kHz	0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.04	0.011 + 0.005
		50 kHz - 100 kHz	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
		100 kHz - 300 kHz <sup>(5)</sup>	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
	1.000000 V to 750.0000 V	3 Hz - 5 Hz	1.00 + 0.02	1.00 + 0.03	1.00 + 0.03	0.100 + 0.003
		5 Hz - 10 Hz	0.35 + 0.02	0.35 + 0.03	0.35 + 0.03	0.035 + 0.003
		<b>10 Hz - 20 kHz</b>	<b>0.04 + 0.02</b>	<b>0.05 + 0.03</b>	<b>0.06 + 0.03</b>	<b>0.005 + 0.003</b>
		20 kHz - 50 kHz	0.10 + 0.04	0.11 + 0.05	0.12 + 0.04	0.011 + 0.005
		50 kHz - 100 kHz <sup>(5)</sup>	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
		100 kHz - 300 kHz <sup>(5)</sup>	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
Resistance <sup>(1)</sup>	100.0000 Ω	1 mA Current Source	0.0030 + 0.0030	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 kΩ	1 mA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	<b>10.00000 kΩ</b>	100 μA	<b>0.0020 + 0.0005</b>	<b>0.008 + 0.001</b>	<b>0.010 + 0.001</b>	<b>0.0006 + 0.0001</b>
	100.0000 kΩ	10 μA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 MΩ	5.0 μA	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 MΩ	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 MΩ	500 nA    10MΩ	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
dc current	10.00000 mA	< 0.1 V Burden Voltage	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	<b>100.0000 mA</b>	< 0.6 V	<b>0.010 + 0.004</b>	<b>0.030 + 0.005</b>	<b>0.050 + 0.005</b>	<b>0.002 + 0.0005</b>
	1.000000 A	< 1 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
	3.000000 A	< 2 V	0.100 + 0.020	0.120 + 0.020	0.120 + 0.020	0.005 + 0.0020
True rms ac current <sup>(4)</sup>	<b>1.000000 A</b>	3 Hz - 5 Hz	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.006
		5 Hz - 10 Hz	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.035 + 0.006
		<b>10 Hz - 5 kHz</b>	<b>0.10 + 0.04</b>	<b>0.10 + 0.04</b>	<b>0.10 + 0.04</b>	<b>0.015 + 0.006</b>
	3.000000 A	3 Hz - 5 Hz	1.10 + 0.06	1.10 + 0.06	1.10 + 0.06	0.100 + 0.006
		5 Hz - 10 Hz	0.35 + 0.06	0.35 + 0.06	0.35 + 0.06	0.035 + 0.006
		10 Hz - 5 kHz	0.15 + 0.06	0.15 + 0.06	0.15 + 0.06	0.015 + 0.006
Frequency or period <sup>(6)</sup>	100 mV to 750 V	3 Hz - 5 Hz	0.10	0.10	0.10	0.005
		5 Hz - 10 Hz	0.05	0.05	0.05	0.005
		10 Hz - 40 Hz	0.03	0.03	0.03	0.001
		<b>40 Hz - 300 kHz</b>	<b>0.006</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.001</b>
Continuity	1000.0 Ω	1mA test current	0.002 + 0.030	0.008 + 0.030	0.010 + 0.030	0.001 + 0.002
Diode test <sup>(6)</sup>	1.0000 V	1mA test current	0.002 + 0.010	0.008 + 0.020	0.010 + 0.020	0.001 + 0.002

## b) Fuente de voltaje Agilent E3644A



La fuente de voltaje Agilent E3644A tiene una energía de salida de 30 a 100W. Este modelo de fuente de voltaje proporciona un voltaje de salida sin ruido, regulación confiable, respuesta transitoria, cuenta con interfaces de comunicación RS-232 y GPIB.

### Salida constante

La fuente de alimentación Agilent E3644A mantiene salida constante cuando ocurren los cambios de la línea y de la carga de energía. La fuente especifica dos tipos de ruido: ruido normal bajo del voltaje del modo y ruido común bajo de la corriente del modo. La especificación baja del ruido del modo normal asegura la energía limpia para los usos del trazado de circuito de la precisión, y la corriente común baja del modo proporciona el aislamiento de la línea de energía inyección de la corriente. Las fuentes de alimentación de Agilent E3644A especifican menos de 90 milisegundos de tiempo que coloca del voltaje en cualquier condición de carga de la salida.

## Interfaces

Las fuentes de alimentación de Agilent E3644A apoyan cualquier PC con una tarjeta del bus de interfaz de fines generales (IEEE-488) o una interfaz RS-232. Cada modelo envía los datos por medio de la interfaz RS-232 y GPIB, los cuales son del tipo SCPI fácil de utilizar (comandos estándares para los instrumentos programables) mantiene la programación rápida y simple.

## Operación Del Panel Delantero

Una perilla rotatoria fácil de utilizar permite fijar rápidamente y fácilmente la salida en la resolución que usted necesita. El voltaje y los niveles actuales se pueden fijar a una resolución máxima de 10 mV/1 mA del panel delantero. Hasta cinco disposiciones completas de la fuente de alimentación se pueden almacenar y almacenar en la memoria permanente interna. El botón on/off fija la salida a cero.

## Energía Versátil

Las fuentes de alimentación de Agilent E3644A protegen la carga de salida contra la sobretensión, que se supervisa y se ajusta fácilmente desde el panel delantero y el interfaz. Estas fuentes de alimentación ofrecen las nuevas terminales de salida en el panel delantero y los terminales screw-type en el panel trasero. Las terminales de salida del panel delantero permiten que usted utilice los conectores de prueba de seguridad, así como los conectores banana y los alambres pelados. La serie de Agilent E3644A emplea un ventilador con el control automático de la velocidad para reducir el ruido acústico.

El siguiente cuadro muestra algunas de las especificaciones técnicas de la fuente Agilent:

Model Number	E3640A	E3641A	E3642A	E3643A	E3644A	E3645A
Maximum Power	30 W		50 W		80W	
# of Output	1	1	1	1	1	1
dc Output Rating (@ 0°C to 40°C)	0 to 8 V / 3 A or 0 to 20 V / 1.5 A	0 to 35 V / 0.8 A or 0 to 60 V / 0.5 A	0 to 8 V / 5 A or 0 to 20 V / 2.5 A	0 to 35 V / 1.4 A or 0 to 60 V / 0.8 A	0 to 8 V / 8 A or 0 to 20 V / 4 A	0 to 35 V / 2.2 A or 0 to 60 V / 1.3 A
Net Weight	5.3 kg (11.7 lbs)		6.2kg (13.7 lbs)		6.7 kg (14.7 lbs)	
Dimension	254.4 mm W x 103.6 mm H x 374 mm D (10 x 4.1 x 14.7 in)					

Model Number	E3646A	E3647A	E3648A	E3649A
Maximum Power	60 W		100 W	
# of Output	2	2	2	2
dc Output Rating (@ 0°C to 40°C)	Two 0 to 8 V / 3 A or 0 to 20 V / 1.5 A	Two 0 to 35 V / 0.8 A or 0 to 60 V / 0.5 A	Two 0 to 8 V / 5 A or 0 to 20 V / 2.5 A	Two 0 to 35 V / 1.4 A or 60 V / 0.8 A
Net Weight	7.3kg (16.1 lbs)		9.2kg (20.3 lbs)	
Dimension	228 mm W x 133 mm H x 374 mm D (8.9 x 5.2 x 14.7 in)			

Load <sup>1</sup> and Line Regulation ±(% of output + offset)	
Voltage	<0.01% + 3 mV
Current	<0.01% + 250 uA
Ripple and Noise (20 Hz to 20 MHz)	
Normal Mode Voltage	<5 mVpp / 0.5 mVrms for 8 V / 20 V models <8 mVpp / 1 mVrms for 35 V / 60 V models
Normal Mode Current	<4 mArms
Common Mode Current	<1.5 uArms
Accuracy 12 Months (@ 25°C ±5°C), ±(% output + offset)	
Programming	
Voltage	<0.05% + 10 mV (<0.1% + 25 mV for output 2 of E3646/47/48/49A)
Current	<0.2% + 10 mA
Readback	
Voltage	<0.05% + 5 mV (<0.1% + 25 mV for output 2 of E3646/47/48/49A)
Current	<0.15% + 5 mA (<0.15% + 10 mA for output 2 of E3646/47/48/49A)
Resolution	
Program	<5 mV / 1 mA
Readback	<2 mV / 1 mA
Meter	10 mV / 1 mA
Transient Response	Less than 50 usec for output to recover to within 15 mV following a change in output current from full load to half load or vice versa.
Settling Time <sup>2</sup>	<90 msec
OVP	
Accuracy, ±(% output + offset)	<0.5% + 0.5 V
Activation time <sup>3</sup>	<1.5 msec, OVP ≥3 V / <10 msec, OVP <3 V
Temperature Coefficient per °C ± (% output + offset)	
Voltage	<0.01% + 3 mV (<0.02% + 5 mV for output 2 of E3646/47/48/49A)
Current	<0.02% + 3 mA
Stability, constant output & temperature ±(% of output + offset), 8 hrs	
Voltage	<0.02% + 2 mV
Current	<0.1% + 1 mA
Remote Sense	1 V
Max voltage drop in each load lead	
AC Input (47 Hz – 63 Hz)	100 Vac ±10% (Opt 0E9) / 115 Vac ±10% (Std) / 230 Vac ±10% (Opt 0E3)
Warranty	1 year
Product Regulation	Designed to comply with UL3111-1; certified to CSA 22.2 No. 1010.1; conforms to IEC 1010-1; complies with EMC directive 89/336/EEC (Group1, Class A)

## c) NanoVolt/micro-Ohm meter Agilent 34420A



La tecnología 34420A nanoVolt/micro-Ohm meter es un multímetro optimizado de alta resolución para mediciones de bajo nivel. Esto combinado con mediciones de voltaje con bajo ruido, además de tener funciones de medición de resistencia y temperatura.

Integration Time	Normal Mode Rejection <sup>2</sup>
200 plc/3.335 s (4 s)	110 dB <sup>3</sup>
100 plc/1.675 s (2 s)	105 dB <sup>3</sup>
20 plc/334 ms (400 ms)	100 dB <sup>3</sup>
10 plc/167 ms (200 ms)	95 dB <sup>3</sup>
2 plc/33.3 ms (40 ms)	90 dB
1 plc/16.7 ms (20 ms)	60 dB
<1 plc	0

### Mediciones de Bajo-Nivel

Los amplificadores de bajo ruido en la entrada y un esquema altamente templado de la protección de la entrada permiten una lectura debajo de los 8 nVpp. También cuenta con 7 1/2 dígitos de resolución, y un filtro seleccionable entre análogo y digital.

Dos Canales de entrada.

Un explorador programable de dos vías integral simplifica comparaciones del voltaje. Las funciones incorporadas del cociente y de la diferencia permiten medidas de dos vías automatizadas sin la necesidad de un explorador externo del nanovoltmetro. Ambos canales comparten las mismas especificaciones bajas del ruido para asegurar comparaciones exactas.

Mediciones en resistencia y temperatura

El 34420A combina sus circuitos de entrada de bajo ruido con una fuente actual de alta estabilidad para proporcionar medidas bajas exactas de resistencia y la complejidad de una fuente actual externa. Tres modos de la resistencia son incluidos: \*Estándar, \*De baja potencia y \*Voltaje-limitado para el circuito de prueba de la remuneración compensada, también se proporciona para reducir al mínimo EMFs termal y errores asociados.

<b>DC Voltage Noise <sup>9</sup></b>			
<b>Range</b>	<b>Observation Period</b>		
	<b>2-Minute RMS Noise</b>	<b>2-Minute Peak-Peak Noise</b>	<b>24-Hour Peak-Peak Noise</b>
1 mV	1.3 nVrms	8 nVpp	12 nVpp
10 mV	1.5 nVrms	10 nVpp	14 nVpp
100 mV	10 nVrms	65 nVpp	80 nVpp
1 V	100 nVrms	650 nVpp	800 nVpp
10 V	450 nVrms	3 $\mu$ Vpp	3.7 $\mu$ Vpp
100 V	11 $\mu$ Vrms	75 $\mu$ Vpp	90 $\mu$ Vpp

<b>DC Voltage Noise vs Source Resistance <sup>10</sup></b>			
<b>Source Resistance</b>	<b>Noise</b>	<b>Analog Filter</b>	<b>Digital Filter</b>
0	1.3 nVrms	Off	Med
100	1.7 nVrms	Off	Med
1k	4 nVrms	Off	Med
10k	13 nVrms	Off	Med
100k	41 nVrms	On	Med
1M	90 nVrms	On	Slow



## Mediciones SPRT

Las rutinas incorporadas de la conversión ITS-90 aceptan los coeficientes de la calibración de su punta de prueba de SPRT para la medida y la conversión directas de la temperatura. Los termopares, los termistores, y RTDs también se apoyan en la misma.

## Flexibilidad Sin igual

El 34420A le da la flexibilidad para abordar sus tareas más desafiantes. Las características de estándar incluyen interfaces de RS-232 y GPIB, lenguaje de programación de SCPI y de Keithley 181, la memoria, arriba de 1024 lecturas, el escalamiento y la estadística, y una salida análoga del registrador de carta.

El 34420A le da la calidad y la confiabilidad que usted espera de las tecnologías de Agilent. El producto es probado un tiempo medio de buen funcionamiento de 150.000 horas.

Function	Digits	Integration Time	Readings/s <sup>5</sup>
dcV	7½	200 plc	.15 (.125)
Thermocouple	7½	100 plc	.3 (.25)
	6½	20 plc	1.5 (1.25)
	6½	10 plc	3 (2.5)
	5½	1 plc	25 (20.8)
	5½	0.2 plc	100 (100)
	4½	0.02 plc	250 (250)
	Resistance	7½	200 plc
dcV1/DCV2	7½	100 plc	.15 (.125)
dcV 1-2	6½	20 plc	.75 (.625)
RTD	6½	10 plc	1.5 (1.25)
Thermistor	5½	1 plc	12.5 (10.4)
0.2 plc	50 (50)		
	4½		
0.02 plc	125 (125)		

## d) Controlador de temperatura WATLOW 981C-20FCNRRG

Para realizar este modulo usaremos un controlador de temperatura WATLOW 981C-20FCNRRG. Es un controlador sencillo y fácil de utilizar, pero con una gran versatilidad en operación y programación. Ofrece varias opciones de operación en rampa, las cuales ofrecen seis pasos en cada archivo.

La entrada analógica primaria acepta 11 diversos tipos del termopar, RTD o entradas de proceso escalable.



Otra de las características de suma importancia, es que este controlador esta provisto de la interfaz RS-232, la cual tendrá como principal función la de mantener la comunicación del dispositivo con el ordenador, siendo esta la responsable de transmitir los dato adquiridos por el dispositivo y desplegarlos posteriormente en un programa en el ordenador.

A continuación de presenta un esquema de conexiones entre el conector DB-9 y el controlador de temperatura, atendiendo previamente a las especificaciones y características de cada uno de ellos.

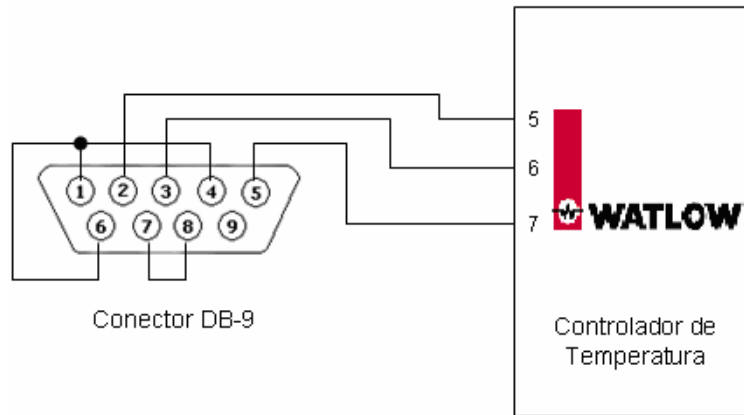


Diagrama de conexiones entre el conector DB9 y el controlador de

Una vez finalizado el acoplamiento del conector con el controlador y logrando tener así una vía de comunicación hacia el ordenador, procederemos a unir los demás elementos como es el relevador de estado sólido, el cual nos servirá como una interfaz de potencia entre los elementos.

Relevador de estado sólido WATLOW DA10-24F0-0200. Es un controlador de alto desempeño, y muy versátil debido a la posibilidad de controlar altas corrientes con entradas de señal bajas.



Relevador de estado sólido WATLOW.

Debido a que el controlador de temperatura maneja un rango de respuesta del orden de los mili amperes, se tiene que acoplar a la salida un dispositivo capaz de soportar la carga, la cual producirá los cambios de temperatura.

Por lo anterior se acoplara el relevador de estado sólido WATLOW DA10-24F0-0200, el cual no presentara ningún problema en le manejo de una alta corriente.

### Diagrama de Conexiones entre el Controlador y el Relevador

El cableado de los sistemas es sencillo, solo se tendrá que conectar a la línea de alimentación de voltaje alterno y posteriormente, atendiendo las especificaciones de estos cablear en el pin correcto la comunicación entre estos dos sistemas.

En el controlador de temperatura, los pines 21 y 22, corresponden a la entrada del voltaje de alimentación de corriente alterna, el pin 11 corresponde al pin de puesta a tierra. Y los pines 12 y 14, corresponde a la salida de comunicación con el relevador siendo estos positivo y negativo respectivamente. En el relevador de estado sólido, los pines 1 y 2, corresponden a la entrada de alimentación de voltaje alterno, teniendo este también un pin extra para la conexión de puesta a tierra. Y los pines 5 y 6, corresponden a al entrada de comunicación con el controlador de temperatura siendo estos positivo y negativo respectivamente. Los pines 3 y 4, que no están cableados en el presente diagrama corresponden a la salida que se conectara posteriormente a la resistencia de carga.

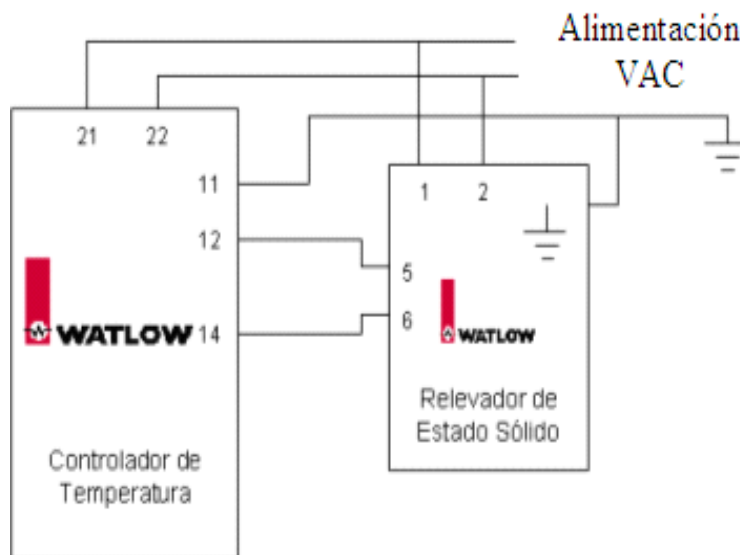


Diagrama de conexión entre el controlador de temperatura y el relevador de estado sólido.