



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE MATERIALES

Instituto de Investigaciones en Materiales

“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MEDICION DE
RESISTIVIDAD Y EFECTO HALL PARA SEMICONDUCTORES”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES

P R E S E N T A

ING. EDUARDO ULISES MARTINEZ ASCENCIO

Tutor principal: Dr. Mario Enrique Rodríguez García - CFATA

Comité tutor: Dr. Eric Mauricio Rivera Muñoz - CFATA

Dr. Sergio Jiménez Sandoval - Cinvestav-IPN

MÉXICO, D.F.

Mayo 31, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue apoyada por el PAPIIT PROYECTO IN 115113 Desarrollo e implementación de sistemas porosos: multicapas, reflectores de Bragg y resonadores de de Fabry Pérot mediante foto acústica diferencial

Quiero agradecer al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, en especial, a quienes fueron coordinadores locales durante mi periodo de estudios por su compromiso e invaluable colaboración.

A esa gran institución que es la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO Y SU CENTRO DE FISICA APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA campus Juriquilla.

En especial a mi tutor el Dr. Mario Enrique Rodríguez García, por sus amplios conocimientos y buena disposición para transmitirlos además por su apoyo invaluable y su trato amistoso y a mi comité tutor los Doctores Eric Mauricio Rivera Muñoz y Sergio Jiménez Sandoval, a los Doctores Domingo Rangel Miranda, José Luis Aragón Vera, Rubén Velázquez Hernández, Ivo Ayala García. Así como también, al Dr. Diego Germán Espinosa Arbeláez y al joven Físico Anderson Felipe Palechor Ocampo, por su apoyo importante para el desarrollo de mi proyecto de tesis.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi escuela de origen el INSTITUTO TECNOLOGICO SUPERIOR DE URUAPAN, su Director el Ing. Raúl Paz Álvarez y a todos mis amigos del personal Administrativo y Académico.

A mis padres ya fallecidos que hubieran visto con alegría el esfuerzo que emprendí hace 2 años, y de manera muy especial a mi esposa Melania Rodarte Rosales, a mis hijos Siddhartha, Eréndira, Yawna y Adriana. Así como también, a mis hermanas Paulina, Patricia, Lorenza y Alejandra por su comprensión y apoyo incondicional. Además, también dedico este trabajo a la Dra. María Eugenia Carbajal Rodarte, por sus atinados consejos y apoyo.

CONTENIDO

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS	11
1 JUSTIFICACIÓN	12
2 MARCO TEORICO	13
3 METODOLOGIA	16
3.1 EL METODO DE VANDER PAUW	
3.2 PROCEDIMIENTO SEGÚN LA NORMA ASTM 76	
4 RESULTADOS.....	22
4.1 DISEÑO DEL SISTEMA	
4.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES	
4.1.2 CONSIDERACIONES SOBRE LA PRECISION Y LIMITACIONES DEL SISTEMA	
4.1.2.1 MEDICION, INSTRUMENTOS Y PARAMETROS BASICOS	
4.1.2.2 CARACTERISTICAS DE LOS INSTRUMENTOS USADOS	
4.1.2.3 ELEMENTOS Y PARÁMETROS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE MEDIDAS	
4.1.2.4 LIMITACIONES DEL SISTEMA	
4.1.3 CONEXIONES	
4.1.3.1 CONEXIONES PARA LA REFERENCIA A TIERRA	
4.1.4 PROGRAMACION DE LA TARJETA 7012-C EN EL CONMUTADOR 7001	

4.2 IMPLEMENTACIONES Y ADAPTACIONES

4.2.1 COMPONENTES FISICOS

4.2.2 ADAPTACION DE LA TARJETA 7012-C DEL CONMUTADOR

4.3 OPERACIÓN Y DISEÑO DEL AUTOMATISMO

4.3.1 DIAGRAMAS DE FLUJO

4.3.2 ALGORITMOS

4.3.3 DISEÑO DEL VI PARA LAS GRAFICAS I-V

4.3.4 DISEÑO DEL VI PARA LA MEDICION Y CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD

4.3.5 DISEÑO DEL VI PARA LA MEDICION Y CÁLCULO DEL VOLTAJE Y EL COEFICIENTE DE HALL

4.4 PARTE EXPERIMENTAL

4.4.1 PREPARACION DE LAS MUESTRAS

4.4.2 MEDICION DE MUESTRAS DE SILICIO CRISTALINO TIPO "P"

4.4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y PRESENTACION DEL REPORTE

4.4.4 CONTRASTACION DEL SISTEMA

4.4.5 MEDICION DESPUES DEL CRECIMIENTO DE SILICIO POROSO

5 CONCLUSIONES.....	89
6 ANEXOS MANUAL DE OPERACION DEL SISTEMA.....	90
7 REFERENCIAS.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

Figura 1 Efecto Hall -----	14
Figura 2 Circuito de medición-----	16
Figura 3 Conmutaciones para la prueba de resistividad-----	17
Figura 4 Posiciones para la medición del efecto Hall-----	17
Figura 5 Gráfica de f vs Q -----	21
Figura 6 Diagrama de bloques-----	22
Figura 7 Interfaces del sistema-----	22
Figura 8 Diagrama de bloques de un instrumento de medición-----	23
Figura 9 Diagrama del instrumento y el dispositivo bajo prueba-----	23
Figura 10 Límite teórico de las medidas-----	24
Figura 11 Datos del multímetro Keihley 2000, -----	25
Figura 12 Datos pico amperímetro Keithley 6485-----	26
Figura 13 (Tomada de la referencia 4) muestra el diagrama de bloques de un sistema -	27
Figura 14 Diagrama básico.(Tomado de la referencia [4])-----	28
Figura 15 Grafico de limitaciones por voltaje de ruido (tomada de la referencia [5]) -----	30
Figura 16 Conexiones físicas del sistema-----	31
Figura 17 Detalle conexiones-----	32,33
Figura 18 Diagrama de conexiones de la tarjeta 7012-C-----	34
Figura 19 Matriz de conexiones de la tarjeta 7012-C-----	34
Figura 20 Conexiones-----	35
Imagen21 Base de pruebas o porta muestra-----	36
Imagen 22 Muestra con contactos de plata en las esquinas-----	36
Imagen 23 Magneto y contenedor de porta muestras-----	37
Imagen 24 Tarjeta matrix switch 7012-C-----	37
Imagen 25 Vista de los aparatos-----	37

Imagen 26 Vista de los instrumentos Keithley ya conectados-----	38
Imagen 27 Vista de las conexiones la red GPIB-----	38
Figura 28 Diagrama esquemático-----	38
Figura 29 Diagrama del PCB-----	39
Imagen 30 Tarjeta sin el conector-----	39
Imagen 31 Tarjeta con el conector adaptado-----	39
Imagen 32 Tarjeta insertada en la ranura 1 del 7001-----	40
Figura 33 Diagrama de flujo funcional para la obtención de la resistividad-----	40
Figura 34 Para el cálculo del efecto Hall-----	41
Figura 35 Para la obtención de las curvas I-V-----	42
Figura 36 Algoritmo para el VI de los gráficos I-V-----	43
Figura 37 Algoritmo para la medición y cálculo de la resistividad-----	44
Figura 38 Algoritmo para la medición del efecto Hall-----	45
Figura 39 Vista del panel frontal curvas I-V -----	46
Figura 40 Marco 0 de la estructura secuencia (stacked) -----	47
Figura 41 Marco 1-----	47
Figura 42 Marco 2 con submarco 0-----	48
Figura 43 Marco 2 con submarco 1-----	48
Figura 44 Marco 2 con submarco 2-----	49
Figura 45 Marco 3 con submarco 0-----	49
Figura 46 Marco 3 submarco 1-----	50
Figura 47 Marco 3 submarco 2-----	50
Figura 48 El ultimo marco 16-----	51
Figura 49 Panel frontal del VI resistividad-----	52
Figura 50 El primero marco 0-----	53
Figura 51 El marco 0 con el submarco 1-----	53
Figura 52 Marco 0, 1er submarco 2, 2º submarco 0-----	54

Figura 53 Marco 0, 1er submarco2 ,2º submarco 1-----	54
Figura 54 Marco 0, 1er submarco 2,2º submarco 2-----	55
Figura 55 El marco 1 de la secuencia-----	55
Figura 56 El marco 2 de la secuencia-----	56
Figura 57 El marco 3 de la secuencia es el que corresponde al cálculo de la resistividad---	56
Figura 58 Grafica de f vs Q-----	58
Figura 59 Aproximación lineal-----	59
Figura 60 El panel frontal del VI para Hall-----	60
Figura 61 El marco 0 , sub marco 0-----	61
Figura 62 El marco 0 sub marco 1-----	61
Figura 63 El marco 0 1er sub marco 2, 2º sub marco 0-----	62
Figura 64 Marco 0 1er sub marco 2, 2º sub marco 1-----	62
Figura 65 Marco 0 1er sub marco2 2º sub marco 2-----	63
Figura 66 Marco 1 Hall-----	63
Figura 67 Marco 2-----	64
Figura 68 Marco 3 sub marco 0-----	64
Figura 69 Marco 3, sub marco 1-----	65
Figura 70 Marco 3 1er sub marco 2 2º sub marco 0-----	65
Figura 71 Marco 3, 1er sub marco2, 2º sub marco 1-----	66
Figura 72 Marco 3 1er sub marco2, 2º sub marco 2-----	66
Figura 73 Marco 4-----	67
Figura 74 Marco 5-----	67
Figura 75 Marco 6 vista del formula node para el cálculo de Hall-----	68
Figura 76 Colocación de la muestra-----	69
Figura 77 Colocación en el magneto -----	69
Figuras 78(a) Gráficos-V,(b) Resistividad. Y(c) Hall, STPU 5-----	70 ,71
Figuras 79 Gráficos-V, Resistividad. y Hall STPU 6-----	71,72

Figuras 80 Gráficos-V, Resistividad. y Hall STPU-3 -----	73, 74
Figuras 81 Gráficos I-V, Resistividad. y Hall STPU-4 -----	74,75
Figura 82 Grafica de aproximación exponencial-----	77
Figura 83 Formula node modificado -----	78
Figuras 84 (a) Resistividad Y (b) Hall STPU-3 -----	79
Figuras 85 (a) Resistividad Y(b) Hall STPU-4 -----	80
Figuras 86 (a) Resistividad Y (b) Hall STPU-5 -----	81
Figuras 87 (a) Resistividad Y (b) Hall STPU-6 -----	82
Figura 88 Grafico de resistividad Vs concentración de portadores -----	83
Figuras 89 (a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y (c) Hall STPU-3 -----	84,85
Figuras 90 (a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y (c) Hall STPU-4 -----	86,87
Figura 91 Plantilla de corte -----	90
Figura 92 Muestras preparadas para la evaporación-----	90
Figura 93(a) Vista de las muestras en la evaporadora (b) la campana(c) vaporizando ----	91
Figura 94 Las muestras vaporizadas -----	92
Figura 95 Aplicación de los contactos de plata -----	92
Figura 96 Vista del horno tubular -----	92
Figura 97 Las muestras -----	93
Figura 98 Cargando las muestras en el horno -----	93
Figura 99 Calentando y circulando gas de argón -----	93
Figura 100 Mediciones del espesor-----	93
Figura 101 Colocación -----	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 De conexiones del sistema-----	31
Tabla 2 De resistividad-----	35
Tabla 3 Para la medición del efecto Hall-----	35
Tabla 4 De programación de la tarjeta 7012 para el grafico I-V-----	36
Tabla 5 De resistividad + concentración de portadores-----	76
Tabla 6 De contrastación o comparación-----	83
Tabla 7 Comparación de resultados antes y después del crecimiento-----	88

RESUMEN

El efecto Hall y la resistividad son fuentes de información de gran riqueza para el conocimiento de las propiedades de conducción de los semiconductores, con la medición del voltaje de Hall y el cálculo del coeficiente de Hall y la medición de la resistividad, se pueden conocer la concentración de impurezas y la movilidad de los portadores, parámetros determinantes de las propiedades de conducción del material y por consiguiente el comportamiento de elementos electrónicos fabricados con los mismos materiales, como el transistor. (Referencia [3])

Aprovechando el equipo de medición con que cuenta **CFATA** en el laboratorio de radiometría y por no haber en la institución un equipo de pruebas adecuado para efectuar pruebas de resistividad y efecto Hall en semiconductores, que son muy importantes para la caracterización de los mismos, nos dimos a la tarea de diseñar e implementar un sistema de medición.

Se diseñó e implementó el sistema que básicamente efectúa mediciones de corriente y voltaje en diferentes posiciones de los contactos de la muestra, y está compuesto por una base de prueba una fuente de corriente un amperímetro y un voltímetro conectados a un conmutador, para su control, todos los instrumentos se encuentran enlazados por medio de un bus de datos GPIB con la computadora que usa Windows XP de 32 bit y un programa de LabView versión 2011.

Se hizo una adaptación muy especial a una tarjeta matrix switch 7012-C del conmutador 7001 diseñando y construyendo un conector de salida que funcionó muy bien como una matriz de 4x4. Por otro lado como no existen antecedentes de automatización para el sistema con los equipos con que contábamos tuvimos que diseñar y desarrollar unos VIs (virtual instruments de LabView) que funcionaron y el sistema está trabajando automatizado.

En cuanto a la parte experimental por la importancia que tienen los contactos de la muestra, que tengan una característica lineal (óhmicos), se investigó y aplico un procedimiento para obtener contactos no rectificantes aplicando pintura de plata en las esquinas encima de aluminio vaporizado y obteniendo una aleación con un tratamiento térmico a la muestra de silicio cristalino tipo "P". Además, se efectuaron pruebas a 4 muestras de silicio tipo P para comprobar el funcionamiento del sistema y se compararon los resultados con un calculador de Solecon Laboratories por último se seleccionaron 2 muestras de baja resistividad en las que se creció silicio poroso y se efectuaron pruebas a dichas muestras después del crecimiento comparando resultados de antes y después del crecimiento.

INTRODUCCION

El silicio poroso es el material muy importante para la microelectrónica moderna, especialmente por su carácter opto electrónico, se fabrica a partir de una oblea de silicio cristalino por medio de un ataque electroquímico con una solución de Ácido fluorhídrico (HF). Según la densidad y profundidad de los poros se pueden obtener diferentes propiedades eléctricas y ópticas. Por el cambio de sus propiedades eléctricas

Como su nombre lo indica es un material que está constituido por una estructura tipo esponja con columnas y poros interconectados entre sí. Dependiendo de sus propiedades puede ser útil para la fabricación de dispositivos opto electrónicos La calidad y las características del silicio poroso crecido dependen en gran medida de las características del sustrato, entre ellas de la cantidad de portadores, que se ve reflejada en cambios en la conductividad y resistividad eléctrica y en la movilidad 2 parámetros de gran importancia y con los cuales se puede calcular la concentración de portadores que es fundamental para determinar las propiedades ópticas y eléctricas del silicio poroso estas medidas se pueden obtener antes y después del crecimiento.

Las principales aplicaciones conocidas en la actualidad, debido a su alta relación superficie /volumen, es un material adecuado para la fabricación de termistores y recubrimientos anti reflejantes en celdas solares, también se utiliza como material bioactivo para el crecimiento de hidroxiapatita y como vehículo de sustancias benéficas para el organismo ya que sus residuos no son tóxicos referencia[12]

OBJETIVOS

Objetivo principal

Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica y de efecto Hall, para semiconductores

Objetivos específicos

Mediante la utilización de la técnica de 4 puntas (Van der Pauw) determinar la resistividad eléctrica y los parámetros de Hall de 4 muestras obtenidas de sustratos de silicio mono cristalino tipo p.

Obtener las mediciones después del crecimiento para 2 muestras

1 JUSTIFICACION

En CFATA se están llevando a cabo tesis doctorales de crecimiento de silicio poroso a partir de sustratos de silicio Mono cristalino dopado, como es sabido la calidad de un silicio poroso depende de las propiedades del sustrato, por lo que es necesario, conocer los valores reales de los parámetros de las obleas para obtener crecimientos de silicio poroso de óptima calidad.

Por otro lado es importante recalcar que en el CFTA no se tiene instrumentada la técnica para medición de resistividad y número de portadores, aunque en diferentes laboratorios se requiere de la misma.

Por esta razón el desarrollo de esta tesis es de fundamental importancia no solo para el laboratorio de radiometría sino también para el centro.

Desde el punto de vista académico es importante estudiar las transformaciones en las propiedades eléctricas de materiales posteriores a procesos como puede ser el de la fabricación de silicio poroso.

2 MARCO TEORICO Referencia [7]

El modelo más sencillo para interpretar el fenómeno de la conducción en metales es el modelo de Drude [1,2]. La hipótesis fundamental del modelo es que los electrones de valencia están libres y que estos electrones pueden ser tratados como las moléculas en teoría cinética de los gases. Se supone que los electrones experimentan colisiones casi instantáneas. A través de estas colisiones los electrones se encuentran en equilibrio térmico a una temperatura T. Entre colisiones se supone que los electrones viajan en línea recta obedeciendo las leyes de Newton. Si tenemos un campo exterior aplicado en la dirección x, tendremos:

$$dv/dt = -e E / m \quad (1)$$

y por tanto los electrones tendrán una velocidad dada por $-(e E/m)t$ mientras el campo siga aplicado. La característica que define el proceso de dispersión que sufren los electrones es el tiempo de relajación τ , o tiempo medio entre colisiones. Dado que los electrones colisionarán (fenómeno de dispersión) después de un tiempo τ , y puesto que después de cada colisión volverán a estar en equilibrio térmico, resultará que un campo eléctrico constante proporcionará a los electrones sólo una velocidad media correspondiente a dicho tiempo τ , dada por:

$$v_d = -(e E/m)\tau \quad (2)$$

Llamada velocidad de deriva. Esta cantidad es por supuesto dependiente del campo aplicado. La magnitud que tiene más interés físico es la movilidad $\mu = e \tau / m$ que es independiente de E.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

La ley de Ohm la podemos escribir en la forma

$J = \sigma E$ ó $E = \rho J$, también expresada en forma tradicional tenemos $V/I = R$ y como $V = E L$ y $J = I/A$ podemos expresar $E/J = R A / L = \rho$

Donde ρ es la resistividad, resistencia en una unidad de área y por unidad de longitud, y σ es la conductividad ($\sigma = 1/\rho$). El modelo supone ambas magnitudes, σ y ρ , escalares.

Supongamos que aplicamos un campo eléctrico y que por tanto los electrones se mueven con una velocidad v_d atravesando cierta superficie de área A en un tiempo dt. La carga que fluye dQ es $-(N/V)e v_d A dt$ donde N es el número de electrones con carga -e. La densidad de corriente será

$$J = -(N/V) e v_d \quad (3) \text{ Utilizando la expresión de } v_d \text{ (de la ecuación 2)}$$

$$\sigma = J/E = -(N/V) e \cdot -(e E/m) \tau / E$$

Obtendremos una expresión para la conductividad

$$\sigma = e n \mu \text{ ó } \rho = 1 / e n \mu \quad (5)$$

Donde n es la concentración de electrones N/V...

EFECTO HALL.

Si una muestra conductora por la que circula una corriente se introduce en el seno de un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente (Fig. 1), los portadores de carga se verán sometidos a una fuerza F_m (fuerza de Lorents) que los desviará hacia uno de los extremos laterales de la muestra:

$$F_m = q (v_d \times B) \quad (10)$$

Tomando en cuenta la ecuación 3:

$$F_m = q (J/q n) \times B = (J \times B)/n$$

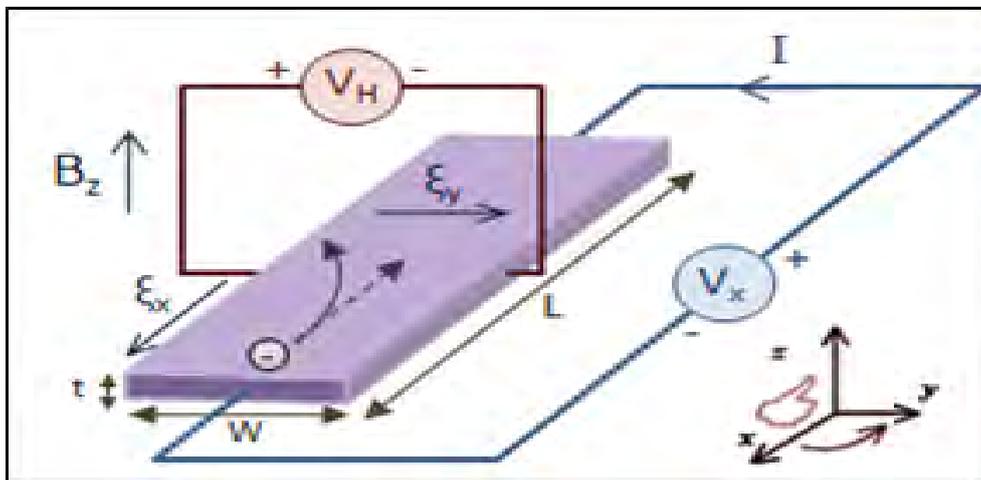


Figura 1 Efecto Hall

Los portadores se desviarán hacia la derecha o hacia la izquierda (según el signo de q), dando lugar a una acumulación de cargas, con lo que aparecerá un campo eléctrico transversal llamado campo de Hall, E_H . El equilibrio se alcanzará cuando la fuerza magnética se compense con la debida al campo de Hall:

$F_m = -F_H = -q E_H$ Luego $E_H = - (J/q n) \times B = -1/q n (J \times B)$ la constante de proporcionalidad R_H se llama coeficiente de Hall, y viene dada por la expresión: $R_H = 1/q n$ (14) El signo de R_H depende del de la carga q. Si lo que realmente se mide es el voltaje de Hall y es igual a $V_H = E_H w$ y la corriente I que es igual a $I = w t J$ y como el producto cruz de los vectores $J \times B = -B_z J_y + B_y J_z, B_z J_x - B_x J_z, -B_y J_x + B_x J_y$, y según nuestro diagrama las únicas componentes diferentes de 0 son B_z y J_x

Nuestra expresión queda $V_H = R_H B_z I_x / t$ donde, V_H es el voltaje de Hall, B_z Es la densidad de flujo magnético en Gauss, I la corriente en amperes, t el espesor de la muestra en cm entonces se puede calcular el valor de R_H y por consiguiente el valor de n (concentración de portadores) y conocido el valor de $\rho = R_H / \mu$ (según la ecuación (5)) se puede calcular la movilidad μ por lo cual se comprueba la utilidad de las mediciones de la resistividad y el voltaje de Hall.

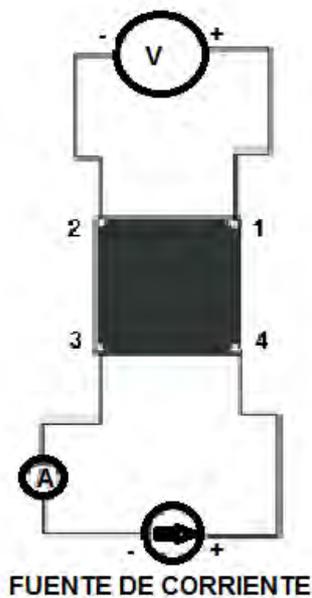
3 METODOLOGIA

3.1 Método de Vander Pauw

Se propone usar el método de Van der Pauw para las mediciones de resistividad, y de efecto Hall de acuerdo con los procedimientos dictados por la norma ASTM F76-86 y adaptado a las recomendaciones de los fabricantes de los equipos de medición y consiste en un sistema que básicamente efectúe mediciones de corriente y voltaje en diferentes posiciones de los contactos de la muestra.

Prueba de resistividad de una muestra de silicio cristalino según el siguiente circuito de medición de 4 puntas con el método de Van Der Pauw, rango máximo inyección de corriente $\mp 20\text{ma}$, rango máximo medición de voltaje $\mp 500\text{mv}$, por efectos de RI^2 la corriente máxima a inyectar debe ser $I < (200R)^{-0.5}$

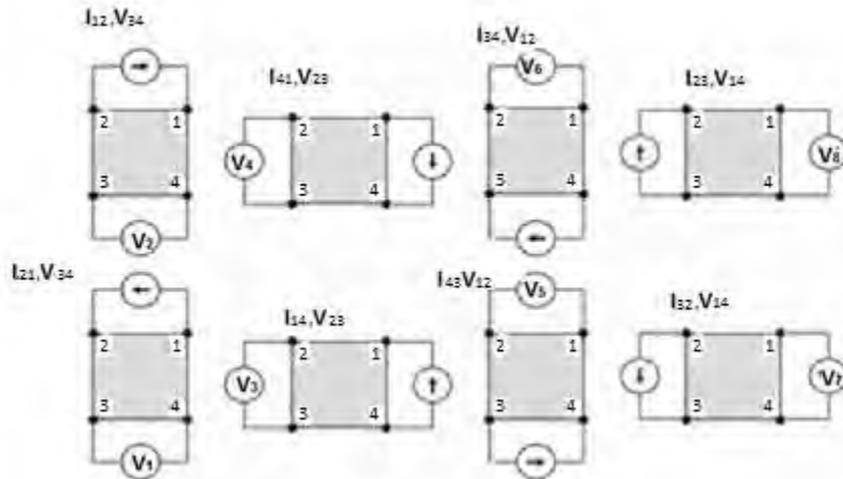
Figura 2 Circuito de medición



Y conmutar las conexiones según las recomendaciones de la norma ASTM 76, de la siguiente manera

Para la resistividad.

Figura 3 conmutaciones para la prueba de resistividad



Y para el efecto Hall,

Figura 4 posiciones para la medición del efecto Hall

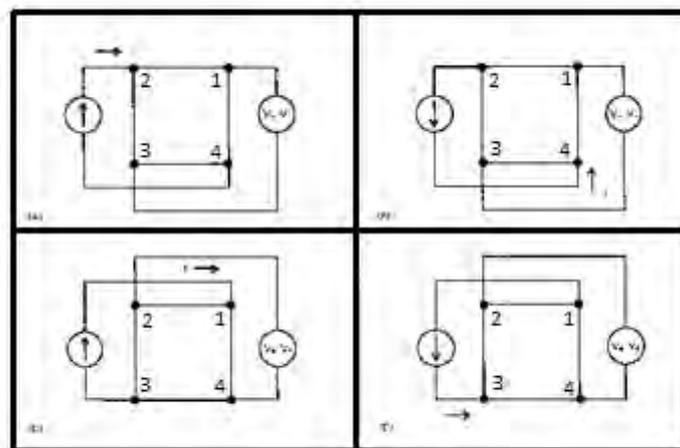


Figure 3-4 Hall Voltage Measurement Configurations

3.2 PROCEDIMIENTO SEGÚN LA NORMA ASTM 76-86 (Referencia [1])

A continuación se toman los puntos textuales de la norma, con su numeración original.

5 Interferencias (cuidados o medidas de seguridad)

5.1 Al efectuar las mediciones de resistividad valores espurios o interferencias pueden presentarse de diversas fuentes.

5.1.1 foto conductividad o efectos fotovoltaicos pueden afectar seriamente las medidas, por lo que las mediciones se deben hacer colocando la muestra en una cámara oscura, que es nuestro caso ya que nuestro contenedor es perfectamente aislante de los efectos luminosos.

5.1.2 Inyección minoritaria de portadores esto se presenta cuando las curvas I-V no son perfectamente lineales (rectas) es decir que no son contactos óhmicos, los usados para las mediciones nosotros usamos contactos de plata dopados con arsénico en el caso de materiales tipo n y con aluminio en el caso de materiales tipo p y efectuado un recocido para formar una aleación Si +Al+Ag que elimine la interface de óxido que se forma antes de aplicar los contactos obteniendo contactos óhmicos en nuestras muestras que verificamos con los gráficos I-V obtenidos en la computadora con un VI de LabView.

5.1.3 Los semiconductores son especialmente sensibles a los cambios de temperatura por eso se recomienda limitar la corriente inyectada para evitar el calentamiento por efectos de RI^2

5.1.4 Las pruebas se ven afectadas y se presentan voltajes espurios en la presencia o cercanía de fuentes de radiación electromagnética de alta frecuencia, situación que debe evitarse y además usar el blindaje adecuado en el contenedor, nuestro contenedor está blindado y no hay fuentes cercanas de radio frecuencia.

5.1.5 En el caso de la medición de altas resistencias puede haber corrientes de fuga superficial en la muestra o en otras partes del circuito, se recomienda usar cables con guarda y amplificadores unitarios conectadas a la guarda, en nuestro caso el sistema se diseñó para medir muestras con bajas resistividades por lo cual no es necesario el uso de los amplificadores, ni guarda

5.1.6 En el caso anterior para evitar las corrientes de fuga se recomienda que las trayectorias de los cables de conexión de muestra e instrumentos sean lo más corto posibles. Que es nuestro caso

5.1.7 Si se presentan inhomogeneidades en la concentración de portadores la movilidad o en la densidad de flujo magnético las pruebas no están garantizadas en sus resultados.

5.1.8 Los efectos termo magnéticos se pueden eliminar obteniendo promedios de los voltajes leídos trasversalmente, nuestro sistema invierte las polaridades de la corriente y calcula promedios de voltaje y corriente compensando de esta manera los efectos termo magnéticos del circuito.

5.1.9 En materiales aniso trópicos cristales no cúbicos, puede haber error en la medición si la dirección de la corriente y el flujo magnético no coinciden con los ejes del cristal

5.1.10 Si se presentan voltajes de offset sin el paso de corriente, por efectos térmicos estos deben compensarse, en nuestro caso se compensa el offset colocando el auto Zero del voltímetro 2000 y del amperímetro 6485 con el set up en posición de Factory default.

5.1.11 Un equivocado coeficiente de Hall será leído si el plano de la corriente y el campo eléctrico no son perfectamente en cuadratura con el flujo magnético.

5.2.1 Errores de medición se presentan si los contactos no son suficientemente pequeños en relación con la distancia entre ellos.

5.2.2 Errores se presentan si los contactos no están colocados en la periferia de la muestra.

7 Aparatos

7.1 para la medición del espesor perfilo metro o micrómetro de caratula o microscopio

7,2 Magneto o imán permanente de 0.5 Tesla

7.3 instrumentos

7.3.1 Fuente de corriente capaz de sostener corriente con una precisión del 0.5%.

7.3.2 Voltímetro o electrómetro con una precisión no menor de 6 ½ dígitos..

7.3.3 Conmutador o matrix switch de relevadores para invertir el flujo de la corriente y cambiar de posición los contactos.

7.3.4 Porta muestras y contenedor opaco perfectamente orientados en cuadratura con el campo magnético. Y que sean de material no magnético

9 Requerimientos de la muestra

9.2 la muestra debe ser mono cristalina y con su orientación definida.

9.3 Forma de la muestra

El espesor de la muestra deberá ser uniforme y su espesor mínimo estará definido por la capacidad de los instrumentos de medición (perfilometro, micrómetro, microscopio)

9.3.1 La muestra deberá ser continua es decir no tener agujeros con discontinuidades geométricas o de concentración de portadores.se recomienda muestras perfectamente cuadradas donde el espesor sea menor de 0.1cm y se cumpla con la siguiente formula $15t \leq L_p$ donde t= espesor, L_p =perímetro

9.4 Coloque los contactos en la periferia de la muestra lo más cercano posible al borde sobre una de las caras separadas por el espesor t, y que sus dimensiones sean pequeñas en relación al perímetro guardando una relación de $0.05L_p$.

10 Procedimiento

10.1 Medición del espesor de la muestra

Efectúe la medición con un perfilo metro digital o un micrómetro de caratula de manera que obtenga una medición con un 1% de error.

10.2 Evaluación de los contactos de la muestra

Verifique que los pares de contactos en ambas polaridades muestren una característica lineal (óhmica) sin ninguna curvatura, las características graficadas I-V deben ser perfectamente lineales a sus valores de corriente aplicada y a la temperatura de la muestra.

10.3 Colocación de la muestra

Coloque la muestra en su contenedor o porta muestras perfectamente limpio, si está usando un imán permanente asegúrese que este alejado de la muestra durante la prueba de resistividad, e inyecte una corriente tal que no produzca un calentamiento en la muestra y la diferencia de temperaturas entre la prueba de resistividad y la prueba de Hall no sea mayor del $\pm 1\%.$ °C

10.4 Medición de la resistividad

Inyecte la corriente según el valor máximo para evitar el calentamiento por el efecto RI^2 ($I < (200R)^{-0.5}$.) donde R = resistencia superficial, obtenida con la formula $R = \rho \times t$ y t= espesor de la muestra en cm, en las 8 posiciones de los contactos marcados en el sentido contrario de las manecillas del reloj y mida los voltajes $V_{12,34}, V_{21,34}, V_{23,41}, V_{32,41}, V_{34,12}, V_{43,12}, V_{41,23}, V_{14,23}$, en los que los índices significan por ejemplo $V_{12,34}$, la corriente entrando por 1 y saliendo por 2 y la diferencia de potencial medida en $V_3 - V_4$, y así sucesivamente, se deben anotar y respetar las amplitudes y signos de las mediciones, mida la temperatura al final de la serie de las ocho mediciones y si es mayor del 1% deje que estabilice y vuelva repetir las mediciones.

10.5 Medición del coeficiente de Hall R_H

Mida la temperatura, coloque la muestra de manera que sus superficies separadas por el espesor t estén perfectamente perpendiculares al campo magnético aplicado de 5600 gauss (0.56T) $B+$ que significa en el sentido positivo de las z, $N \rightarrow S$ inyecte corriente y mida $V_{31,42}, B+, V_{13,42}, B+, V_{42,13}, B+, V_{24,13}, B+$, rote el campo 180° $B- , S \leftarrow N$, inyecte y mida $V_{31,42}, B-, V_{13,42}, B-, V_{42,13}, B-, V_{24,13}, B-$, mida la temperatura y cheque su estabilidad.

11 Cálculos

11.1 Resistividad

Calcule los valores de la resistividad a partir de los datos obtenidos en 10.4 y con las siguientes formulas:

$$\rho_A = ((1.1331 f_A t) \times [+ V_{21,34} - V_{12,34} + V_{32,41} - V_{23,41}]) / I$$

$$\rho_B = ((1.1331 f_B t) \times [+ V_{43,12} - V_{34,12} + V_{14,23} - V_{41,23}]) / I \quad \text{donde } I = \text{Corriente en amperes} \quad 1.1331 = \pi/4 \ln(2)$$

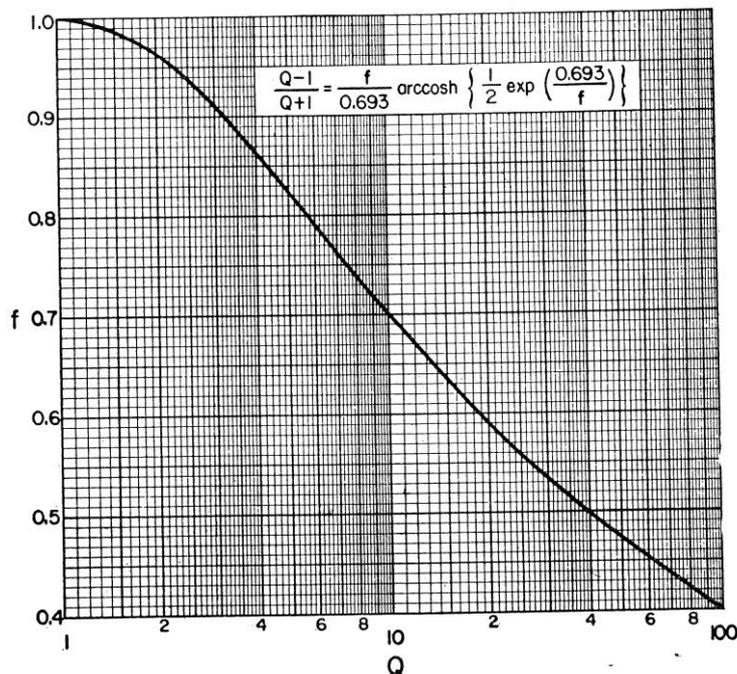
t= espesor en cm, V= los voltajes medidos en volts

Y los factores geométricos f_A y f_B definidos por medio de $Q_A = (V_{21,34} - V_{12,34}) / (V_{32,41} - V_{23,41})$

Y $Q_B = (V_{43,12} - V_{34,12}) / (V_{14,23} - V_{41,23})$

La relación entre Q y f definida por la siguiente gráfica y ecuación.

Figura 5 grafica de f vs Q



Si Q resulta menor que 1 obtenga los recíprocos y calcule los valores de f, los valores de ρ_A y ρ_B no deben tener una diferencia de $\pm 10\%$ si la tienen es que se trata de muestras no homogéneas y deben desecharse y sus lecturas no son válidas, calcule el valor promedio de la resistividad con la siguiente formula: $\rho_{pro} = (\rho_A + \rho_B)/2$.

11.2 Obtenga el coeficiente de Hall R_{HC} y R_{HD} con las siguientes formulas:

$$R_{HC} = (2.50 \times 10^7 \text{ t}) [(V_{31,42}, B+) - (V_{13,42}, B+) + (V_{13,42}, B-) - (V_{31,42}, B-)] / BI$$

$$R_{HD} = (2.50 \times 10^7 \text{ t}) [(V_{42,13}, B+) - (V_{24,13}, B+) + (V_{24,13}, B-) - (V_{42,13}, B-)] / BI \text{ y los valores de V medidos en 10.5}$$

Si la diferencia entre R_{HC} y R_{HD} no es menor del 10% la muestra no es homogénea y debe desecharse y sus valores calculados no son válidos.

Calcule el valor promedio del coeficiente con la siguiente formula:

$$(R_{HC} + R_{HD})/2 = R_{HPROM} \text{ cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$$

Y obtenga el valor de la movilidad μ_H con $u_H = |R_{HPROM}| / \rho_{pro} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ si desea calcular la concentración de portadores p ó n use un factor $r=1$ y como $R_{HPROM} = 1/nq$ despejando n queda

$$1/((R_{HPROM}) \times e) = n, \text{ donde } e = \text{carga del electrón. Y para el tipo p seria } p = 1/((R_{HPROM}) \times e)$$

4 RESULTADOS

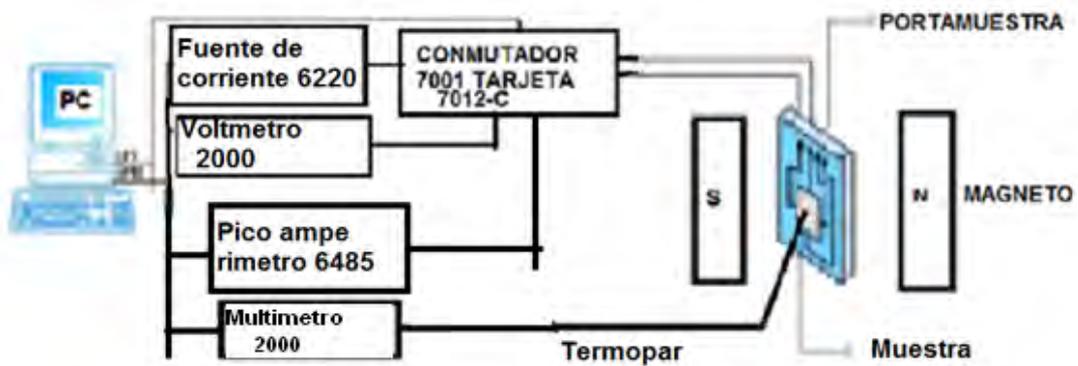
4.1 DISEÑO DEL SISTEMA

4.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la UNAM CFATA en el laboratorio de Radiometría se cuenta con los instrumentos de medición, 2 multímetro Keithley 2000, fuente de corriente 6220 y el pico amperímetro 6485 y también el escáner 7001, se optó por la compra de la tarjeta matrix switch card 7012-C que es una matriz de 4 renglones por 10 columnas, por lo tanto presentamos los diagramas de bloques del sistema.

El sistema es como se presenta en el siguiente diagrama de bloques

Figura 6 diagrama de bloques



Para su comunicación con el controlador (PC) el sistema está conectado por cables GPIB y una



Figura 7 interfaces del sistema

Interface GPIB USB-HS de National Instruments

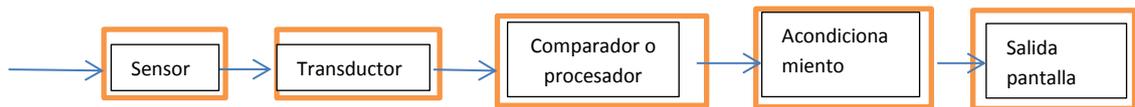
4.1.2 CONSIDERACIONES SOBRE LA PRECISION Y LIMITACIONES DEL SISTEMA

4.1.2.1 MEDICION INSTRUMENTOS Y PARAMETROS

Medir es obtener una magnitud por comparación con una magnitud de valor unitario, toda medición está sujeta a error, los instrumentos de medición tienen la función, de medir las magnitudes físicas con el mínimo error mejorando así nuestra percepción, la propiedad o magnitud que se quiere medir en el instrumento, se capta por medio de un sensor y con un transductor se transforma en una señal eléctrica por lo general de voltaje, para que pueda ser leída en el comparador y de ahí pasar a la pantalla o display del instrumento, las señales pueden ser analógicas o digitales las analógicas forman un conjunto continuo de datos, las digitales están formadas por conjuntos discretos.

El diagrama de bloques de un instrumento es como sigue:

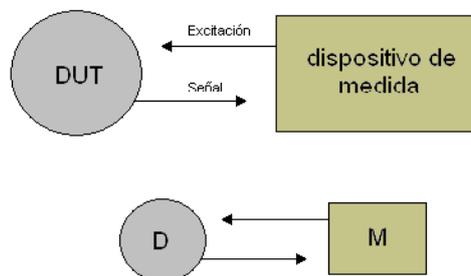
Figura 8 diagrama de bloques de un instrumento de medición



La parte del sensor es la que capta la señal, el transductor la transforma y acondiciona por filtrado y conversión A/D (analógica a digital) el comparador es donde se compara y procesa la señal ahí se efectúa propiamente el acto de medir, el acondicionador prepara la señal para ser mostrada en la pantalla

Básicamente un sistema de medida se constituye con un instrumento de medida y un dispositivo medido o bajo prueba (DUT).según la siguiente figura (tomada de la referencia [4])

Figura 9 diagrama del instrumento y el dispositivo bajo prueba



La medida efectúa la conversión de los valores analógicos (señal eléctrica a la salida del sensor físico) a valores digitales. Esta conversión A/D es necesaria en cada medida digital. El voltaje en

CC (corriente continua), la corriente en CC, y la resistencia son magnitudes eléctricas que son medidas a menudo con multímetros digitales (DMM).

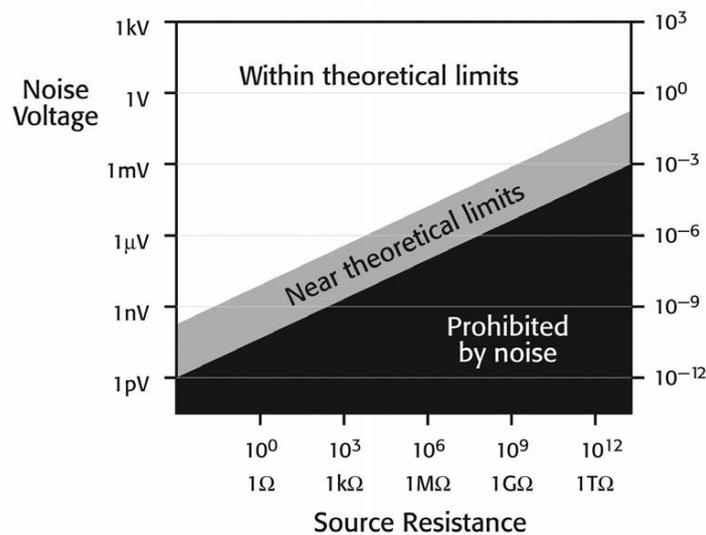
Normalmente, estos instrumentos son adecuados para medidas de señales de niveles, mayores que $1\mu\text{V}$ ó $1\mu\text{A}$, o por debajo de $1\text{G}\Omega$. Sin embargo, en ocasiones, la precisión de los multímetros no se encuentra dentro de los límites teóricos de la medida eléctrica, por lo que no la pueden medir correctamente. Para señales de bajo nivel, son necesarios instrumentos más sensibles como electrómetros, pico amperímetros y nanovoltímetros, que puedan realizar medidas de señales por debajo de $1\mu\text{V}$ ó $1\mu\text{A}$, o por encima de $1\text{G}\Omega$.

Por esa razón, es muy importante conocer cuáles son los límites teóricos de la señal, eléctrica a medir, con el fin de poder emplear el instrumento adecuado a la medida.

El límite teórico de sensibilidad en cualquier medida está determinado por el ruido térmico generado por las resistencias que presenta el circuito. La figura siguiente

(Tomada de la referencia [2])

Figura 10 límite teórico de las medidas



Muestra los límites teóricos en la medida de voltaje, a una temperatura ambiente de, 300K, se observa como la alta resistencia de la fuente limita la sensibilidad teórica de la medida de, voltaje.

Un multímetro tipo DMM está limitado a sensibilidades del orden de μV (6 ½ dígitos), por lo tanto según la figura es muy difícil que pueda medir voltajes de fuentes o Duts con resistencia interna mayores de $10^5 \Omega$. Precisamente esta es una de las limitaciones de nuestro sistema de lo cual hablaremos en el apartado 7.1.2.3

4.1.2.2 CARACTERISTICAS DE LOS INSTRUMENTOS USADOS

Son muchos los instrumentos que permiten realizar medidas en CC. Entre otros se incluyen electrómetros, multímetros digitales, nanovoltímetros, picoamperímetros, unidades

SourceMeter, micro-ohmmetros, etc. A continuación se comentan las características de los utilizados en este proyecto: Multímetro digital (DMM). Son los instrumentos más populares puesto que permiten realizar medidas tanto de tensión como de corriente y resistencia con costo reducido, y con una precisión y sensibilidad adecuadas en la mayoría de los casos. Sin embargo, su impedancia de entrada no es suficientemente buena en caso de medidas en condiciones de alta impedancia. Se emplean esquemas básicos para realizar la medida utilizando un DMM, la mayoría de los multímetros digitales incluyen las siguientes funciones de medida: voltaje en CC, voltaje en CA (corriente alterna), corriente en CC, corriente en CA y óhmetro. En nuestro caso usamos un multímetro digital marca Keithley modelo 2000 con una resolución de 6 ½ dígitos y un rango de 1µV a 1000 volts como se muestra en la siguiente figura:

Figura 11 datos del multímetro Keithley 2000

Model 2000 specifications

2000

6½-Digit Multimeter

DC Characteristics

Conditions: MED (1 PLC) or SLOW (10 PLC) or MED (1 PLC) with filter of 10

Accuracy: ±(ppm of reading + ppm of range) (ppm = parts per million) (e.g. 10ppm = 0.001%)

Function	Range	Resolution	Test Current or Burden Voltage (±5%)	Input Resistance	24 Hour ¹⁴ 23°C ± 1°	90 Day 23°C ± 5°	1 Year 23°C ± 5°	Temperature Coefficient 0°-10°C and 20°-50°C
Voltage	100.0000 mV	0.1 µV	> 10 GΩ	> 10 GΩ	30 + 30	40 + 35	50 + 35	2 + 6
	1.000000 V	1.0 µV	> 10 GΩ	> 10 GΩ	15 + 6	25 + 7	30 + 7	2 + 1
	10.00000 V	10 µV	> 10 GΩ	> 10 GΩ	15 + 4	20 + 5	30 + 5	2 + 1
	100.0000 V	100 µV	10 MΩ ± 1%	10 MΩ ± 1%	15 + 6	30 + 6	45 + 6	5 + 1
1000.000 V	1 mV	10 MΩ ± 1%	10 MΩ ± 1%	20 + 6	35 + 6	45 + 6	5 + 1	
Resistance ¹⁵	100.0000 Ω	100 µΩ	1 mA	> 10 GΩ	30 + 30	80 + 40	100 + 40	8 + 6
	1.000000 kΩ	1 mΩ	1 mA	> 10 GΩ	20 + 6	80 + 10	100 + 10	8 + 1
	10.00000 kΩ	10 mΩ	100 µA	> 10 GΩ	20 + 6	80 + 10	100 + 10	8 + 1
	100.0000 kΩ	100 µΩ	10 µA	> 10 GΩ	20 + 6	80 + 10	100 + 10	8 + 1
	1.000000 MΩ ¹⁶	1 Ω	10 µA	> 10 GΩ	20 + 6	80 + 10	100 + 10	8 + 1
	10.00000 MΩ ¹⁶	10 Ω	700 mA @ 10MΩ	> 10 GΩ	150 + 6	200 + 10	400 + 10	95 + 1
Current	10.00000 mA	10 nA	< 0.75 V	> 10 GΩ	60 + 30	300 + 80	500 + 80	50 + 5
	100.0000 mA	100 nA	< 0.05 V	> 10 GΩ	100 + 300	300 + 800	500 + 800	50 + 50
	1.000000 A	1 µA	< 0.3 V	> 10 GΩ	200 + 30	500 + 80	800 + 80	50 + 5
	10.00000 A	10 µA	< 1 V	> 10 GΩ	1000 + 25	1200 + 40	1200 + 40	50 + 5
Continuity ZW	1 kΩ	100 mΩ	1 mA	> 10 GΩ	40 + 100	100 + 100	120 + 100	8 + 1
	10.00000 V	10 µV	1 mA	> 10 GΩ	20 + 6	30 + 7	40 + 7	8 + 1
	10.00000 V	10 µV	100 µA	> 10 GΩ	20 + 6	30 + 7	40 + 7	8 + 1
Diode Test	10.00000 V	10 µV	1 mA	> 10 GΩ	20 + 6	30 + 7	40 + 7	8 + 1
	10.00000 V	10 µV	100 µA	> 10 GΩ	20 + 6	30 + 7	40 + 7	8 + 1
	10.00000 V	10 µV	10 µA	> 10 GΩ	20 + 6	30 + 7	40 + 7	8 + 1

DC OPERATING CHARACTERISTICS²

Function	Digits	Readings/s	PLCs ³
DCV (all ranges)	6½ ⁴	5	10
DCI (all ranges) and Ohms (<10M range)	6½ ⁴	30	1
	6½ ⁴	30	1
	5½ ⁴	270	0.1
	5½ ⁴	500	0.1
	5½ ⁴	1000	0.04
	6½ ⁴	2000	0.01

DC SYSTEM SPEEDS^{2,4}

RANGE CHANGE: 50%

FUNCTION CHANGE: 0.5%

AUTO-RANGE TIME: <50ms

ASCII READINGS TO RS-232 (9.2K BAUD): 55%

MAX. INTERNAL TRIGGER RATE: 2000/s

MAX. EXTERNAL TRIGGER RATE: 400/s

DC GENERAL

LINEARITY OF 10VDC RANGE: ±(1ppm of reading + 2ppm of range)

DCV, Ω, TEMPERATURE, CONTINUITY, DIODE TEST INPUT PROTECTION: 1000V, all ranges

MAXIMUM OPEN LEAD RESISTANCE: 10% of range per lead for 100Ω and 1kΩ ranges, 1kΩ per lead for all other ranges

DC CURRENT INPUT PROTECTION: 3A, 250V fuse

SHUNT RESISTOR: 0.1Ω for 5A, 1A, and 100mA ranges, 30Ω for 30mA range

CONTINUITY THRESHOLD: Adjustable 1Ω to 1000Ω

AUTOZERO OFF ERROR: Add ±(2ppm of range error + 5µV) for <10 minutes and ±1°C change

OVER-RANGE: 120% of range except on 1000V, 1A, and diode

SPEED AND NOISE REJECTION

Rate	Readings/s	Digits	RMS Noise 10V Range	NMR ¹³	CMRR ¹⁴
10 PLC	5	6½	< 1.5 µV	60 dB	140 dB
1 PLC	30	6½	< 4 µV	60 dB	140 dB
0.1 PLC	300	5½	< 22 µV	—	80 dB
0.01 PLC	2000	6½	< 150 µV	—	80 dB

DC NOTES

- Add the following to "ppm of range" uncertainty: 1V and 100V, 2ppm; 100mV, 100µV, 100nV, 1kΩ-1MΩ, 2ppm; 10mA and 1A, 10ppm; 100mA, 4ppm
- Speeds are for 60Hz operation using factory default operating conditions (PRT). Average off, display off, Trigger delay = 0.
- Speeds include measurements and binary data transfer via the GPIB.
- Auto zero off.
- Sample cross = 1024, auto zero off.
- Auto zero off, NRFC = 0.01s.
- Ohms = 24 readings/second.
- 1 PLC = 16.67ms @ 60Hz, 20ms @ 50Hz/400Hz. The frequency is automatically determined at power up.
- For signal levels > 900V, add 0.10ppm/V uncertainty for the portion exceeding 900V.
- Add 120ms for ohms.
- Must have 10S matching of load resistance in input III and I/O.
- For line frequency ±0.1%
- For 1kΩ resistance to 1.0 lead
- Relative to calibration accuracy
- Specifications are for 4-wire ohms. For 2-wire ohms, add 1kΩ additional uncertainty
- For rear input, add the following to temperature coefficient "ppm of reading" uncertainty: 100kΩ 0.5ppm, 100kΩ 0.50ppm. Operating environment specified for 0° to 50°C and 90% RH at 50°C.

DIGITAL MULTIMETERS & SYSTEMS

1.888.KEITHLEY (U.S. only)

www.keithley.com

A Greater Measure of Confidence

Pico amperímetros.

Un pico amperímetro es un amperímetro constituido a partir de la función de sistema de medida de corriente de un electrómetro. Son necesarios cuando se quieren realizar medidas de pequeñas corrientes. Por tanto, son utilizados para la medida de resistencia en el DUT a caracterizar, donde es necesaria la detección de señales de muy baja intensidad. En nuestro sistema utilizamos un Pico amperímetro marca Keithley modelo 6485 con una resolución de 5½ dígitos y un rango 20ma a 2na, según la siguiente figura:

Figura 12 datos picoampermetro Keithley 6485

6485 Picoammeter Specifications

RANGE	D½ DIGIT DEFAULT RESOLUTION	ACCURACY (1σ) ¹ ±% RDG. + OFFSET	TYPICAL RMS NOISE ²	ANALOG RISE TIME ³ (10% to 90%)
2 mA	10 fA	0.4 % + 400 fA	20 fA	8 ms
20 mA	100 fA	0.4 % + 1 pA	100 fA	8 ms
200 nA	1 pA	0.2 % + 10 pA	1 pA	500 μs
2 μA	10 pA	0.15% + 100 pA	10 pA	300 μs
20 μA	100 pA	0.1 % + 1 nA	100 pA	500 μs
200 μA	1 nA	0.1 % + 10 nA	1 nA	500 μs
2 mA	10 nA	0.1 % + 100 nA	10 nA	500 μs
20 mA	100 nA	0.1 % + 1 pA	100 nA	500 μs

TEMPERATURE COEFFICIENT: 0°-14°C: 0.2%/°C; 15°-50°C: 0.1%/°C. For each °C, add 0.1% (% rdg. + offset) to accuracy spec.

INPUT VOLTAGE SENSITIVITY: $200\mu V$ on all ranges except $1mV$ on 20mA range.

MAXIMUM INPUT CAPACITANCE: Stable to 10nF on all nA ranges and 2μA range; 1μF on 20μA and 200μA ranges, and on mA ranges.

MAXIMUM CONTINUOUS INPUT VOLTAGE: 220VDC.

NUMBERS: 150 or 600; 60dB.

MAXIMUM COMMON MODE VOLTAGE: 42V.

ISOLATION (Meter Common to chassis): Typically >50VDC in parallel with c1nF.

ANALOG OUTPUT: Scaled voltage output (inverting 2V full scale on all ranges) 3% $\pm 2mV$ 1kΩ impedance.

¹ At 1 PLC - limited to 60 rdgs/sec under this condition.

² At 6 PLC, 1 standard deviation, 100 readings, filter off, capped input - limited to 10 rdgs/sec under this condition.

³ Measured at analog output with resistive load >100kΩ.

IEEE-488 BUS IMPLEMENTATION

MULTILINE COMMANDS: DCL, LLD, SDC, GET, GTC, UNF, UMI, SPS, SPD.

IMPLEMENTATION: SCPI (IEEE-488.2, SCPI-1396.0); DDC (IEEE-488.1).

ONLINE COMMANDS: IFC, REN, EOL, SRQ, ATN.

INTERFACE FUNCTIONS: SHI, AHI, TS, TRS, LA, LLD, SRQ, HLI, FPO, DCL, DTL, CL, DL.

PROGRAMMABLE PARAMETERS: Range, Zero Check, Zero Correct, EOL (DDC mode only), Trigger, Terminator (DDC mode only), Calibration (SCPI mode only), Display Format, SRQ, RSE, Output Format, V-Offset Cal.

ADDRESS MODES: TALK ONLY and ADDRESSABLE.

LANGUAGE EMULATION: Keithley Model 485 emulation via DDC mode.

RS-232C IMPLEMENTATION:

Supports: SCPI-1396.0.

Baud Rate: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19.2k, 38.4k, 57.6k.

Protocol: Xon/Xoff, 7 or 8 bit ASCII, parity-odd/even/none.

Connector: DB-9 (FDD) or DB-9 (M).

GENERAL

INPUT CONNECTOR: BNC on rear panel.

DISPLAY: 12 character vacuum fluorescent.

RANGING: Automatic or manual.

OVERRANGE INDICATION: Display reads "OVERFLOW".

CONVERSION TIME: Selectable 0.01 PLC to 60 PLC (50%LC under 50Hz operation). (Adjustable from 200μs to 1s).

READING RATE:

To internal buffer: 1000 readings/second¹

To IEEE-488 bus: 300 readings/second^{1,2}

Notes:

¹ 0.01 PLC, digital filter off, front panel off, auto zero off.

² Binary transfer mode (IEEE-488.1).

BUFFER: Stores up to 2500 readings.

PROGRAMS: Provide front panel access to IEEE address, choice of engineering units or scientific notation, and digital calibration.

EMC: Conforms with European Union Directive 89/336/EEC, EN61326-1.

SAFETY: Conforms with European Union Directive 73/23/EEC, IEC61010-1.

TRIGGER LINE: Available, see manual for usage.

DIGITAL FILTER: Median and averaging (selectable from 2 to 100 readings).

ENVIRONMENT:

Operating: 0°-50°C; relative humidity 70% non-condensing, up to 30°C. Above 30°C, de-rate humidity by 2% for each °C.

Storage: -25° to +50°C.

WARM-UP: 1 hour to rated accuracy (see manual for recommended procedure).

POWER: 100-120V or 220-240V, 50-60Hz, 20VA.

PHYSICAL:

Case Dimensions: 38mm high x 214mm wide x 307mm deep (2½ in. x 8½ in. x 14½ in.).

Working Dimensions: Front face to rear including power coil and IEEE-488 connector: 394mm (15.5 inches).

Net Weight: <math>< 4.6</math> kg (<math>< 10.1</math> lbs).

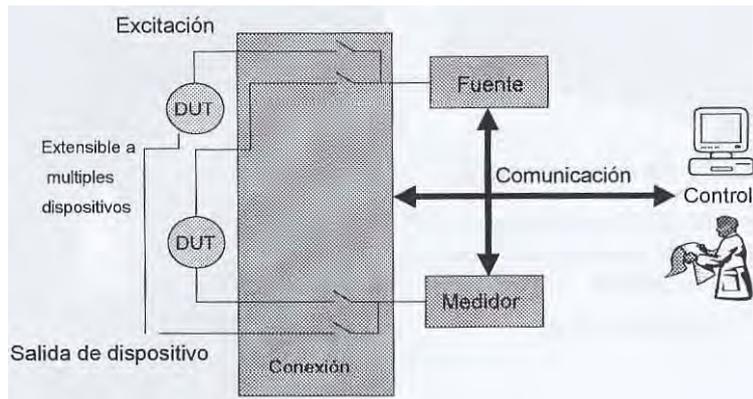
Shipping Weight: <math>< 5</math> kg (<math>< 11</math> lbs).

Una determinada medida se puede realizar con más de un tipo de instrumento, sin embargo, la elección del más adecuado depende de las condiciones particulares de cada prueba o medida a realizar.

4.1.2.3 ELEMENTOS Y PARÁMETROS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE MEDIDAS. (Referencia [4])

Todo sistema de medida se compone de varios elementos comunes,

la Figura # 13 (Tomada de la referencia 4) muestra el diagrama de bloques de un sistema de medidas.



En el diagrama de bloques de un sistema de medida se distinguen los siguientes elementos:

- El dispositivo bajo test (DUT).
- La fuente, que excita con una señal al DUT.
- Un instrumento de medida, encargado de medir la señal que devuelve el DUT excitado.
- cables, que permiten realizar las medidas.
- La conexión entre los distintos instrumentos.
- El sistema de control (PC).

PARÁMETROS BÁSICOS DE UN INSTRUMENTO. (Referencia [4])

Diagrama de bloques del instrumento.

La figura muestra el diagrama de bloques del instrumento formado por tres etapas. En la primera etapa, las señales analógicas presentes en el mundo real se adecúan a través de una etapa de acondicionamiento, que las adaptan a los niveles de entrada apropiados del convertidor A/D (típicamente $\pm 10V$).

En la segunda etapa, el convertidor A/D proporciona a su salida una señal digital caracterizada por un número de bits (longitud de palabra). Este número de bits constituye el número de pasos o cuentas que admite el convertidor. El número máximo de cuentas define la resolución del convertidor A/D. Así, un convertidor de 8 bits sólo podrá dar a la salida $2^8 = 256$ valores posibles, mientras que otro de 16 bits (mayor resolución) permite $2^{16} = 65536$ valores.

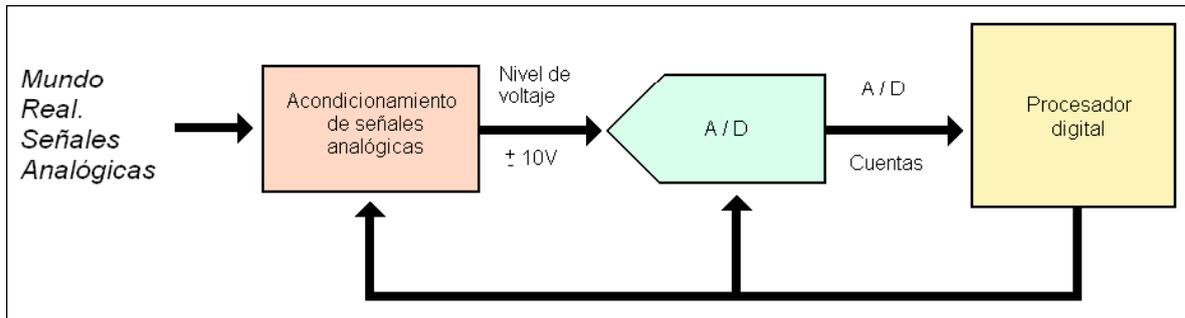


Figura 14 Diagrama básico de un instrumento de medida.(Tomado de la referencia [4])

En la tercera etapa, el procesador digital se encarga de controlar la etapa de entrada analógica y el convertidor A/D en la toma de lecturas. Cuando el convertidor ha terminado una conversión, los circuitos digitales leen el código y aplican el factor de escala que proporciona el nivel de entrada real.

La resolución del convertidor A/D fija el máximo número de dígitos de información útil que puede ser mostrado en el panel del instrumento. Por otra parte, se define el campo de medida o rango como el conjunto de valores comprendidos entre el límite superior e inferior entre el que puede efectuarse la medida, siendo el fondo de escala la diferencia entre el límite superior e inferior de medida.

RESOLUCIÓN/SENSIBILIDAD. (Referencia 4)

En los instrumentos de medida, una variación continua de la señal de entrada no da lugar a una variación continua en la salida, más bien parece tener una forma escalonada. La resolución de un instrumento se define como el cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento. Está determinada por el convertidor A/D del dispositivo de medida.

Hay varias formas de caracterizar la resolución: bits, número de dígitos, cuentas, etc.

Por ejemplo, una resolución de 12 bits de un convertidor A/D indica que es capaz de representar 4096 combinaciones binarias ($2^{12}=4096$). Además del número de cuentas, otra forma muy típica de especificar la resolución de un multímetro digital es a partir de su número de dígitos. Así, un multímetro de 3 dígitos tiene un contador de 1000 cuentas pues con 3 dígitos se puede contar desde 000 hasta 999. Un multímetro de 4 dígitos dispone de un contador de 10000 cuentas (0000 hasta 9999). Un multímetro de $3\frac{1}{2}$ dígitos tiene un contador de 2000 cuentas (0000 a 1999), pues $\frac{1}{2}$ significa que el dígito más significativo (el que está a la izquierda) puede valer 0 ó 1. En la fracción m/n de este convenio, m expresa el máximo alcance del dígito más significativo, y n su número de estados diferentes. Por ejemplo, en un multímetro de $3\frac{3}{4}$ dígitos (4000 cuentas, de 0000 a 3999) el dígito más significativo puede llegar a valer como máximo 3 y puede tener 4 estados distintos (0, 1, 2, y 3).

Otra manera de especificar la resolución es dándole valor al bit o al dígito de menor peso. Para ello necesitamos saber el rango de medida. La resolución se obtiene, por tanto, de dividir el intervalo del rango de medida (valor máximo del rango – valor mínimo del rango) por el número total de cuentas. Por ejemplo, un voltímetro de 5½ dígitos sobre un intervalo de 10V tendrá una resolución: Resolución en un intervalo de 10V , $10V / 200000$ cuentas , 50 μ V.

Un multímetro digital de 1000 cuentas, para los rangos de 0-1V y de 0-1000V tendrá una resolución distinta.

Cuando hablamos de convertidores A/D el valor del bit menos significativo recibe el nombre de LSB (Less Significant Bit), y se ajusta a la definición de resolución. El valor de 1 LSB depende del rango que consideremos. Así, un convertidor A/D de 12 bits sobre un rango de 0V a 1V tendrá una resolución: 1 LSB $1V / 4096$ cuentas ,244 μ V de resolución. La sensibilidad es la relación del cambio incremental en la salida para un cambio incremental en la entrada.

La sensibilidad de un instrumento (expresada en unidades del parámetro a medir) está caracterizada por su rango más bajo (intervalo de medida más bajo) dividido por el número de cuentas. Por ejemplo, la sensibilidad de un convertidor A/D de 16 bits en una escala de 2V es $2V/2^{16} = 2V/65536 = 30\mu$ V. La sensibilidad de un multímetro de 3 ½ dígitos (2000 cuentas) sobre rango de 2V es $2V/2000 = 1$ mV.

PRECISIÓN/EXACTITUD/INCERTIDUMBRE.(Referencia [4])

La precisión (repetibilidad) se define como la capacidad de un instrumento de dar siempre un mismo resultado al medir la misma magnitud. La precisión se expresa como un porcentaje de la escala completa. Por ejemplo, para un voltímetro con una escala de 100V y una precisión de 0,05% toda lectura estará sujeta a una imprecisión de 0,05V (= 0,05·100V/100). Si se mide 3.70V, el voltaje estará entre 3,65V y 3.75V.

Exactitud se define como la aproximación con que la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.

No se debe confundir los términos precisión y exactitud. La precisión no garantiza la exactitud, pero la exactitud necesita de la precisión. Mientras que la exactitud está referida al grado de aproximación entre el valor medido y el valor real, la precisión especifica el grado de concordancia de un conjunto de medidas.

La incertidumbre es el intervalo o rango de los valores posibles de una medida considerando todas las fuentes posibles de error que intervienen. Se trata del máximo error de la medida. El resultado de una medida, como el voltaje, puede expresarse acompañado de su incertidumbre, de la siguiente forma: $V \pm \Delta V$ (donde $\pm \Delta V$ representa la incertidumbre). Una medida de voltaje dada por el siguiente resultado: $2.33V \pm 0.01V$, significa que el valor exacto (verdadero) de V está comprendido entre $V - \Delta V = 2.32$ V y $V + \Delta V = 2.34$ V. El valor verdadero de la magnitud queda incluido en el intervalo: $2.32V \leq V \leq 2.34V$.

Como regla general se toma como incertidumbre la precisión del instrumento. En ocasiones, aunque no sea demasiado correcto, se toma la mitad de la precisión como incertidumbre.

4.1.2.4 LIMITACIONES DEL SISTEMA

Las limitaciones de nuestro sistema como ya se pueden inferir consisten en el límite superior para mediciones de muestras hasta $10^5 \Omega$ como ya lo vimos en la gráfica de valores límites (en el apartado 7.1.2.1 y en la gráfica siguiente) de la medida por nivel de ruido es decir que no se pueden medir muestras de materiales aislante y esto se debe a la falta del uso de la guarda y también a la falta de amplificadores unitarios, en el límite inferior se pueden medir muestras con resistencia superficial de hasta 0.05Ω equivalente a una resistividad de $0.0025 \Omega\text{-cm}$ para una muestra de $500 \mu\text{m}$ de espesor y la causa de esta limitación es la resolución de nuestro voltímetro de medida Keithley 2000 que es de $6 \frac{1}{2}$ dígitos o hasta un $1 \mu\text{V}$ y por lo tanto hay que inyectar corrientes relativamente grandes del orden de mA para que puedan ser medidas, no tenemos limitaciones de medición por la velocidad de la medida que no debe ser grande por la estabilización debida principalmente a los efectos capacitivos del circuito ya que nuestras mediciones se hacen con intervalos de hasta dos segundos y son suficientemente grandes para permitir una lectura estable.

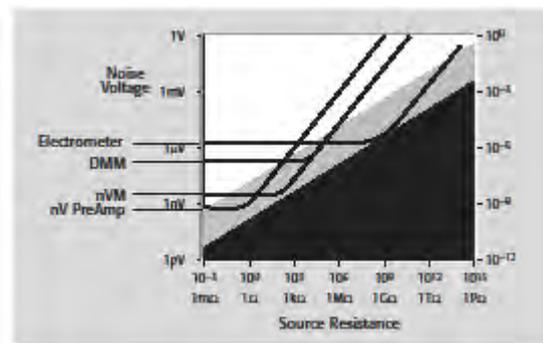


Figura 15 Grafico de limitaciones de medida por voltaje de ruido (tomada de la referencia [5])

4.1.3 CONEXIONES

A continuación se muestran las conexiones físicas del sistema como se podrá observar la guarda de los cables de los instrumentos 6220 y 6485 se conectan entre sí por las conexiones LO 6220 y LO 6485 por lo tanto no deben conectarse a la tarjeta 7012-C para que queden flotando es decir no se usa guarda y esto representa una limitación de las mediciones del sistema en cuanto a la medición de altas resistencias o resistividades (materiales aislantes $R > 1 \text{M}\Omega$), pero no afecta a las mediciones de baja resistencia o resistividad, ya que la resistencia de aislamiento de los cables es muy grande en comparación de la resistencia de la muestra

Figura 16 conexiones físicas del sistema

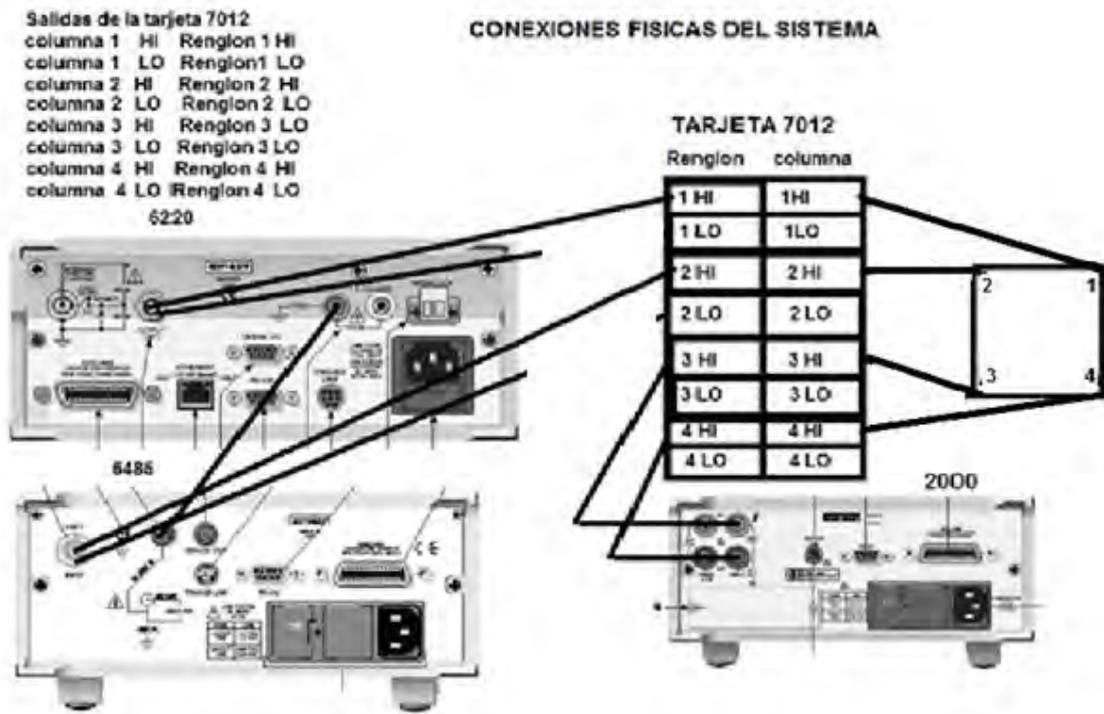


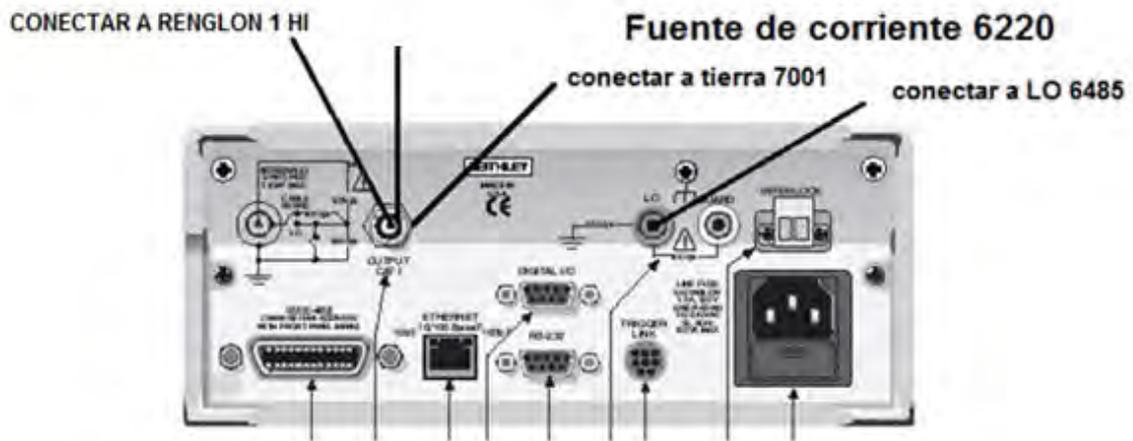
Tabla 1 de conexiones del sistema

Instrumento	Terminal instrumento	Cable adaptador	Terminal tarjeta 7012-c
Fuente de corriente 6220	HI	TRIAx	REGLON 1 HI
	G	TRIAx	
	LO	BANANA A LO 6485	
Pico amperímetro 6485	HI	BNC	REGLON 2 HI
	G	BNC	
	LO	BANANA A LO 6220	
Voltímetro 2000	HI	BANANA	REGLON 3 HI
	LO		REGLON 4 HI

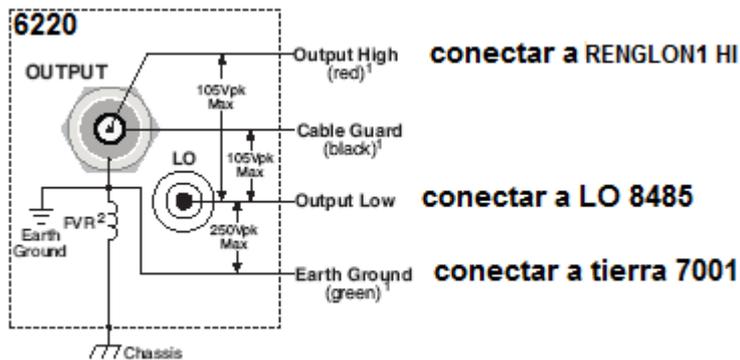
MUESTRA	TERMINAL PORTA MUESTRAS	CABLE ADAPTADOR	TERMINAL TARJETA 7012-C
MUESTRA DE	B=ROJO		COLUMNA 1 HI

SILICIO TIPO P	G		
	A=NEGRO		COLUMNA 2 HI
	G		
	D=BLANCO		COLUMNA 3 HI
	G		
	C=VERDE		COLUMNA 4 HI
	G		

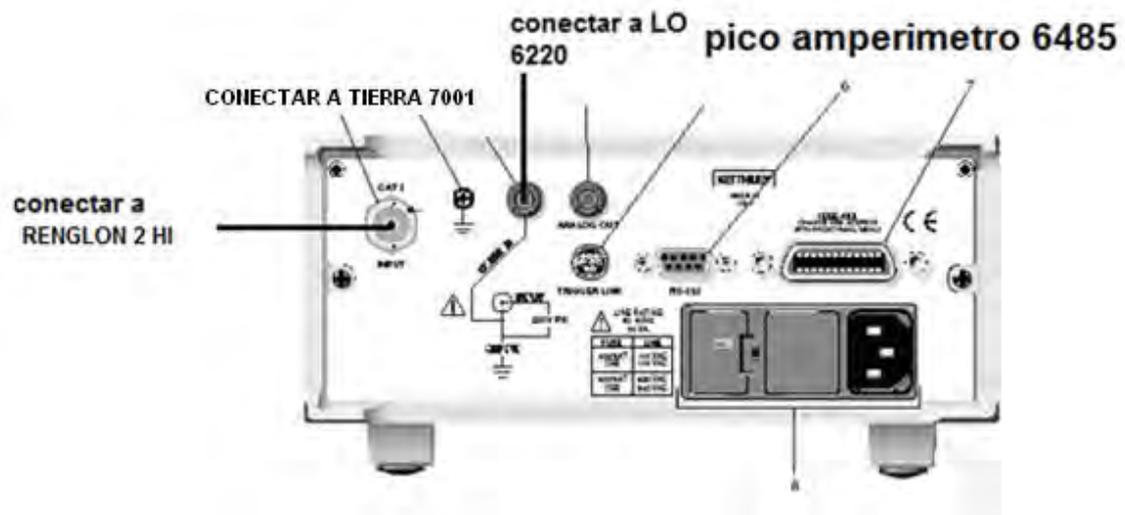
Figura 17 detalle conexiones,(a)6220,(b)6485,(c)2000



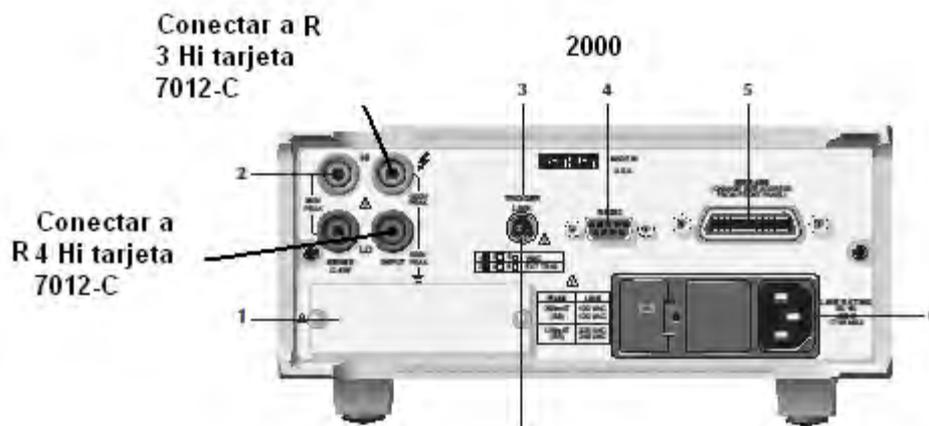
(a) 6220



(a) 6220



(b) 6485



(c) 2000

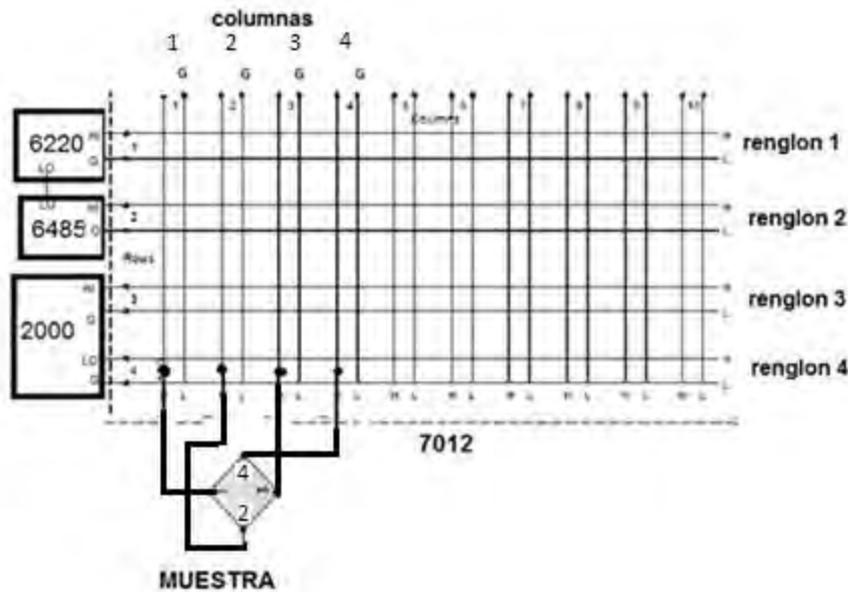
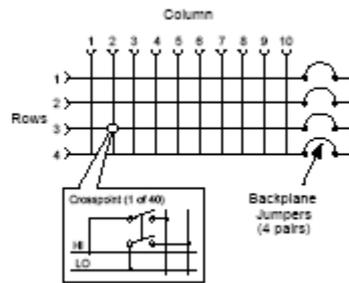
4.1.3.1 CONEXIONES PARA LA REFERENCIA A TIERRA

Como no debe haber circuitos cerrados en las conexiones a tierra (loops) se selecciona una conexión única a tierra y es por medio de la clavija de la toma de energía (120 volts) del instrumento 7001 que está conectada con su carcasa y por lo tanto se unen las carcasa de todos los instrumentos con la carcasa del 7001 para obtener una referencia de tierra pero sin ningún circuito cerrado o loop de tierra.

4.1.4 PROGRAMACION DE LA TARJETA 7012-C EN EL CONMUTADOR 7001

Para los cambios de posición de las conexiones a los contactos mostradas en la metodología, para el método de Van der Pauw, instrumentadas con la tarjeta 7012-C y el escáner 7001 obtenemos el siguiente diagrama de conexiones.

Figura 18 diagrama de conexiones de la tarjeta 7012-C



Representado en la nomenclatura del escáner con la siguiente matriz en la que cada cruce representa un punto que se puede abrir o cerrar en el diagrama anterior

Figura 19 matriz de conexiones de la tarjeta 7012-C

MATRIZ DE CONEXIONES 7012 - C

	1	2	3	4
Fuente de corriente -	(1! 1! 1)	(1! 1! 2)	(1! 1! 3)	(1! 1! 4)
Pico ampermetro -	(1! 2! 1)	(1! 2! 2)	(1! 2! 3)	(1! 2! 4)
Voltmetro -	(1! 3! 1)	(1! 3! 2)	(1! 3! 3)	(1! 3! 4)
voltmetro -	(1! 4! 1)	(1! 4! 2)	(1! 4! 3)	(1! 4! 4)

Y el primer dígito representa la ranura en la que está colocada la tarjeta 7012-C dentro del escáner 7001 el segundo separado por una exclamación es el renglón y el tercero es la columna, por ejemplo si cerramos el punto 1!3!2 significa que estamos conectando el + del voltímetro al punto 2 de la muestra con estos elementos programamos la tarjeta 7012-C

quedando las siguientes tablas con las posiciones o lista de canales guardados en la memoria del escáner.

Quedando para la resistividad. Tabla 2 de resistividad

$V_{12,34}$	1!1!1	1!2!2	1!3!3	1!4!4	I_{12}, V_{34}	M1	V[0]
$V_{21,34}$	1!1!2	1!2!1	1!3!3	1!4!4	I_{21}, V_{34}	M2	V[1]
$V_{23,41}$	1!1!2	1!2!3	1!3!4	1!4!1	I_{23}, V_{41}	M3	V[2]
$V_{32,41}$	1!1!3	1!2!2	1!3!4	1!4!1	I_{32}, V_{41}	M4	V[3]
$V_{34,12}$	1!1!3	1!2!4	1!3!1	1!4!2	I_{34}, V_{12}	M5	V[4]
$V_{43,12}$	1!1!4	1!2!3	1!3!1	1!4!2	I_{43}, V_{12}	M6	V[5]
$V_{41,23}$	1!1!4	1!2!1	1!3!2	1!4!3	I_{41}, V_{23}	M7	V[6]
$V_{14,23}$	1!1!1	1!2!4	1!3!2	1!4!3	I_{14}, V_{23}	M8	V[7]

Donde por ejemplo si se cierra la lista almacenada en la memoria M1 corresponde a las siguientes conexiones

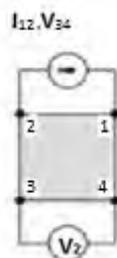


Figura 20 Conexiones corriente entrando por 1 y saliendo por 2, medición de voltaje entre 3+ y 4- y el voltaje medido es = $V_{12,34}$

Tabla 3 para la medición del efecto Hall ,queda

V_{H1}	B+	1!1!1	1!2!3	1!3!4	1!4!2	M10	$V_{13,42}$	Vp[0]
V_{H2}	B+	1!1!3	1!2!1	1!3!4	1!4!2	M11	$V_{31,42}$	Vp[1]
V_{H3}	B+	1!1!2	1!2!4	1!3!1	1!4!3	M12	$V_{24,13}$	Vp[2]
V_{H4}	B+	1!1!4	1!2!2	1!3!1	1!4!3	M13	$V_{42,13}$	Vp[3]
V_{H5}	B-	1!1!1	1!2!3	1!3!4	1!4!2	M10	$V_{13,42}$	Vn[0]
V_{H6}	B-	1!1!3	1!2!1	1!3!4	1!4!2	M11	$V_{31,42}$	Vn[1]
V_{H7}	B-	1!1!2	1!2!4	1!3!1	1!4!3	M12	$V_{24,13}$	Vn[2]
V_{H8}	B-	1!1!4	1!2!2	1!3!1	1!4!3	M13	$V_{42,13}$	Vn[3]

Como se puede observar las posiciones de medición V_{H1} y V_{H5} son iguales lo único que cambia es el sentido del campo magnético aplicado donde B+ significa en el sentido del eje de las Z y B- el inverso lo mismo para las siguientes

La tabla para la obtención de las curvas I-V, como la fuente 6220 tiene la característica de cambiar de polaridad queda

Tabla 4 de programación de la tarjeta 7012 para el grafico I-V

(1!1!2)	(1!2!1)	(1!3!3)	(1!4!4)	$I_{21}V_{34}$	M2	V2
(1!1!3)	(1!2!2)	(1!3!4)	(1!4!1)	$I_{32}V_{41}$	M4	V4
(1!1!4)	(1!2!3)	(1!3!1)	(1!4!2)	$I_{43}V_{12}$	M6	V6
(1!1!1)	(1!2!4)	(1!3!2)	(1!4!3)	$I_{14}V_{23}$	M8	V8

4.2 IMPLEMENTACIONES Y ADAPTACIONES

4.2.1 COMPONENTES FISICOS

El sistema está constituido por los siguientes componentes:

COMPONENTES FISICOS DEL SISTEMA

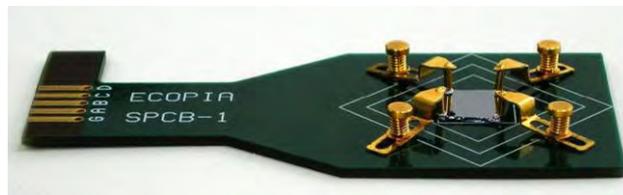


Imagen21 base de pruebas o porta muestra



Imagen 22 muestra de silicio cristalino con contactos de plata en las esquinas

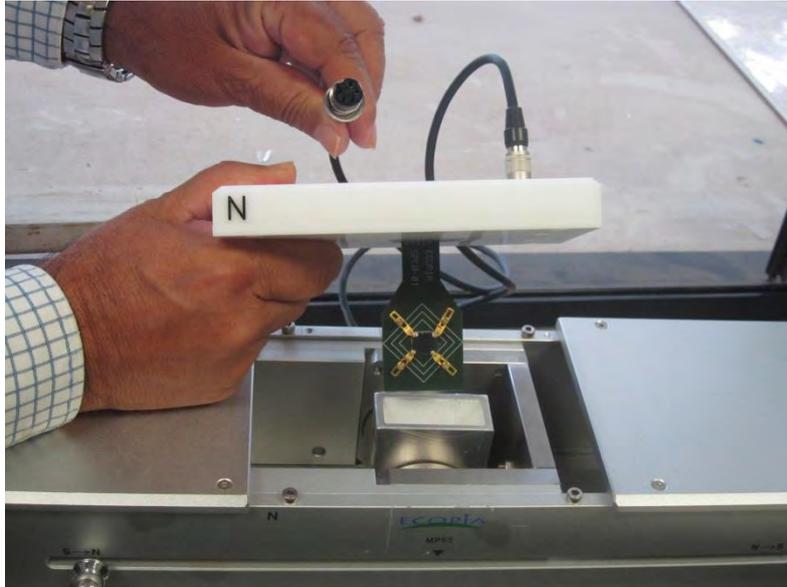


Imagen 23 Magneto y contenedor de porta muestras y cable de conexión con salida tipo Din 45322 de 5 pines hembra 60°,240°

Imagen 24 Tarjeta matrix switch 7012-C con su conector de salida adaptado



Imagen 25 vista de los aparatos

Vista de los aparatos de medición abajo 7001, a la derecha de arriba abajo 6220,2000 para el termopar,2000 voltímetro y 6485 pico amperímetro

Imagen 26 Vista del sistema, los instrumentos Keithley ya conectados al fondo el magneto y el contenedor de la muestra

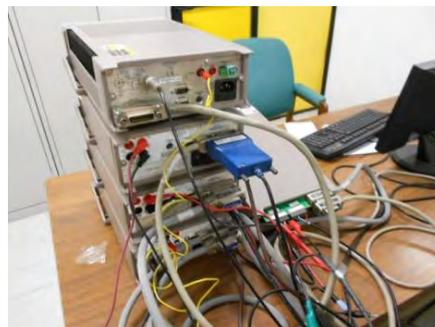


Imagen 27 Vista de las conexiones la red GPIB y la interface de salida GPIB USB-HS

4.2.2 ADAPTACION DE LA TARJETA 7012-C DEL CONMUTADOR

Se diseñó un conector de salida para la tarjeta 7012-C, porque no lo tenía y era necesario para la conexión del DUT y los instrumentos de medida de acuerdo a los siguientes diagramas para obtener una matriz de 4x4.

Figura 28 Diagrama esquemático

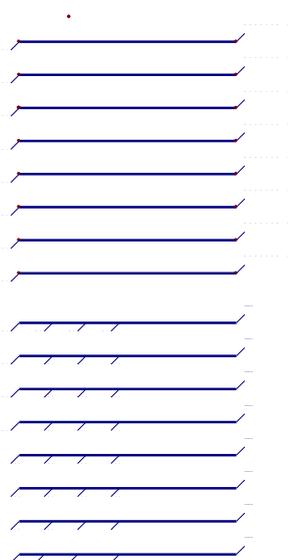


Figura 29 Diagrama del PCB

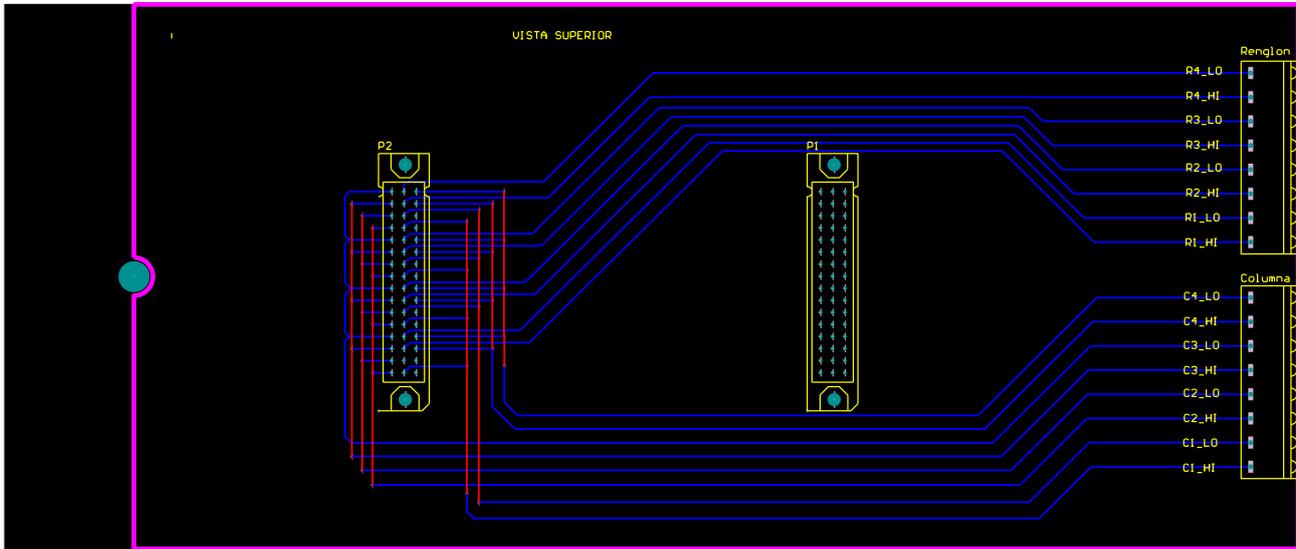


Imagen 30 Tarjeta sin el conector y con cables provisionales para la identificación y adaptación del conector



Imagen 31 Tarjeta con el conector adaptado

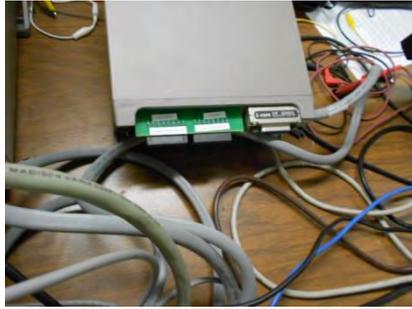


Imagen 32 Tarjeta insertada en la ranura 1 del 7001

Se hizo la programación manual según las tablas mostradas en el apartado 7.1.4 y funciono perfectamente

4.3 OPERACIÓN Y DISEÑO DEL AUTOMATISMO referencia [11]

4.3.1 DIAGRAMAS DE FLUJO

Figura 33 Diagrama de flujo funcional para la obtención de la resistividad

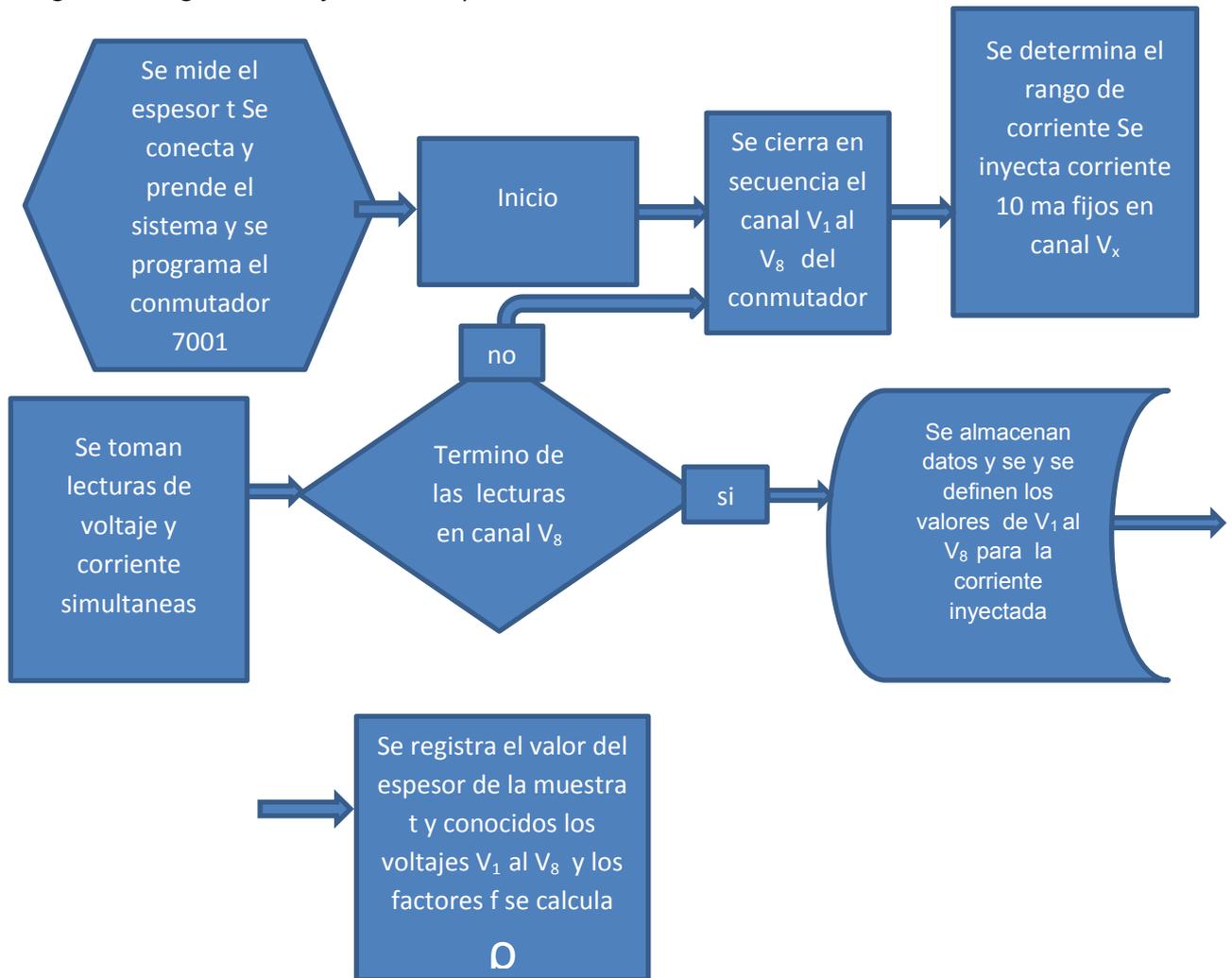
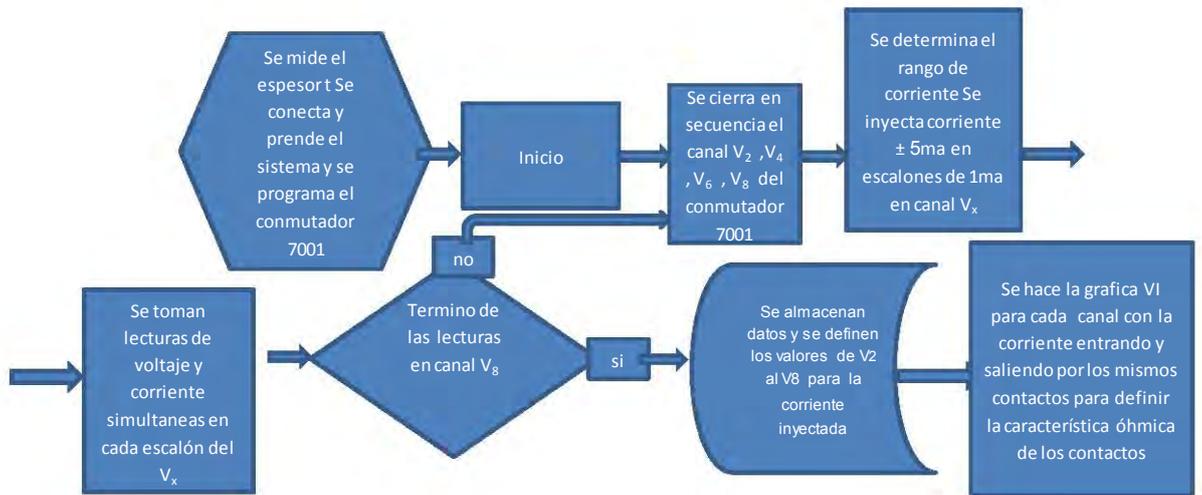


Figura 34 Para el cálculo del efecto Hall



Figura 35 Para la obtención de las curvas I-V.



7.3.2 ALGORITMOS referencia [11]

Figura 36 Algoritmo para el VI de los gráficos I-V

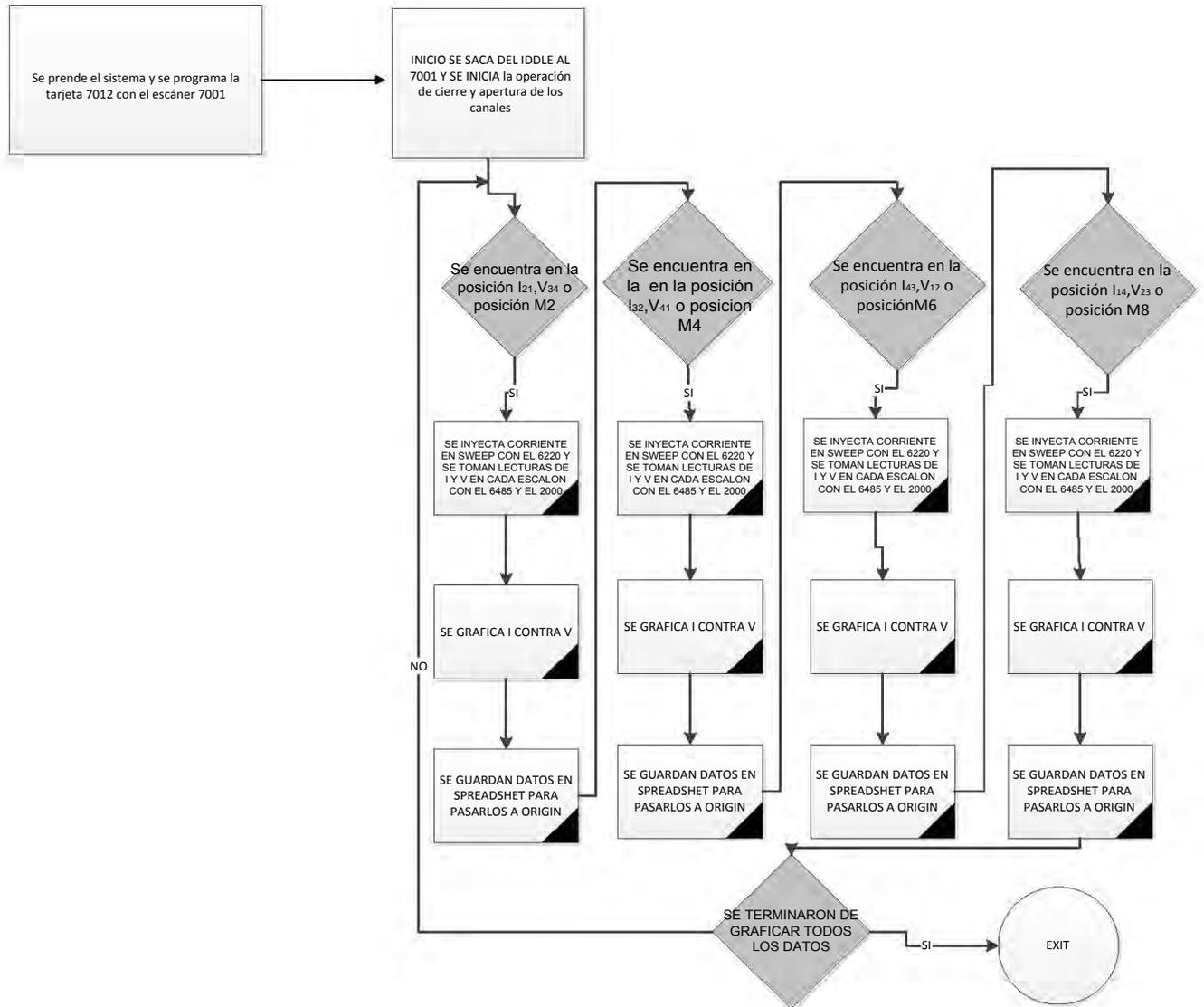


Figura 37 Algoritmo para la medición y cálculo de la resistividad

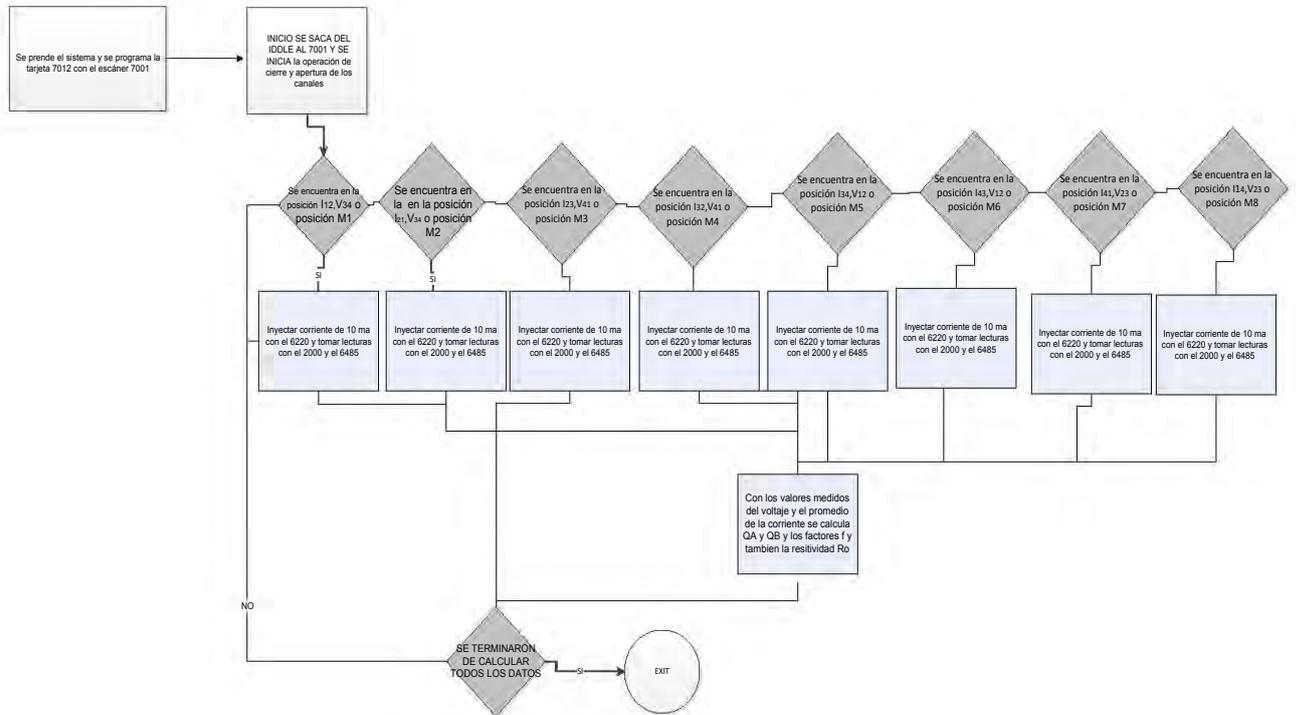
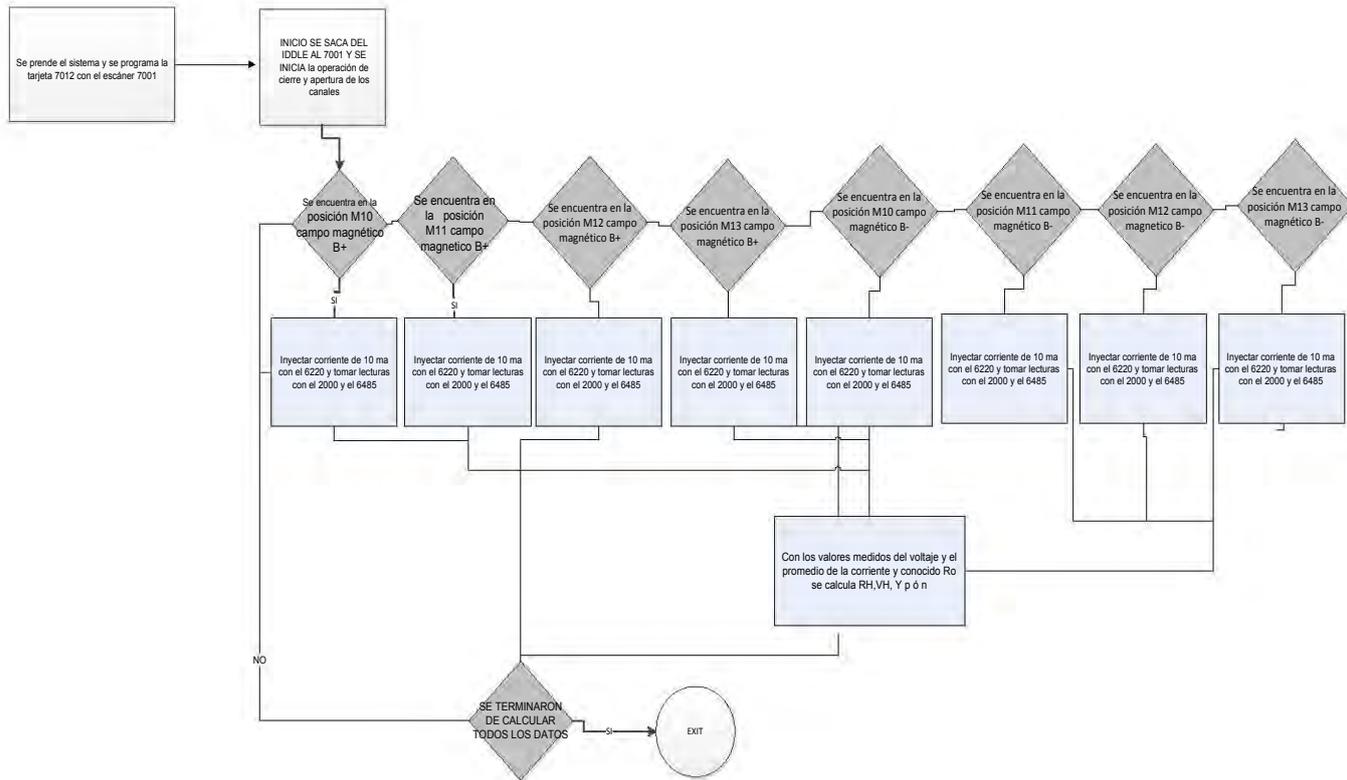


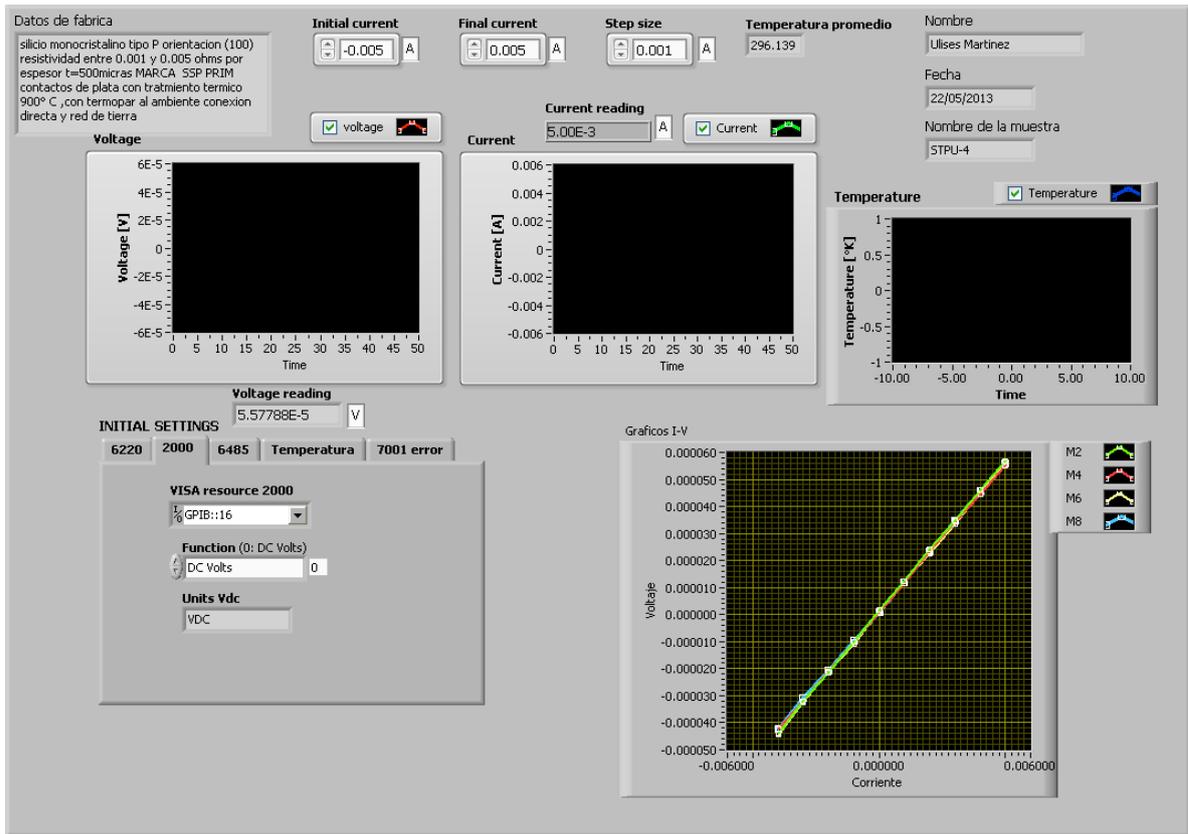
Figura 38 Algoritmo para la medición del efecto Hall



4.3.3 DISEÑO DEL VI PARA LAS GRAFICAS I-V Referencia [11]

Para obtener el VI de las gráficas I-V se uso el algoritmo mencionado adaptándolo en LabView con el uso de una estructura tipo secuencia (stacked) de 16 marcos cuyos códigos se repiten únicamente cambiando la posición de la memoria M del 7001 según la tabla mostrada en el apartado 7.1.4 y es según la siguiente.

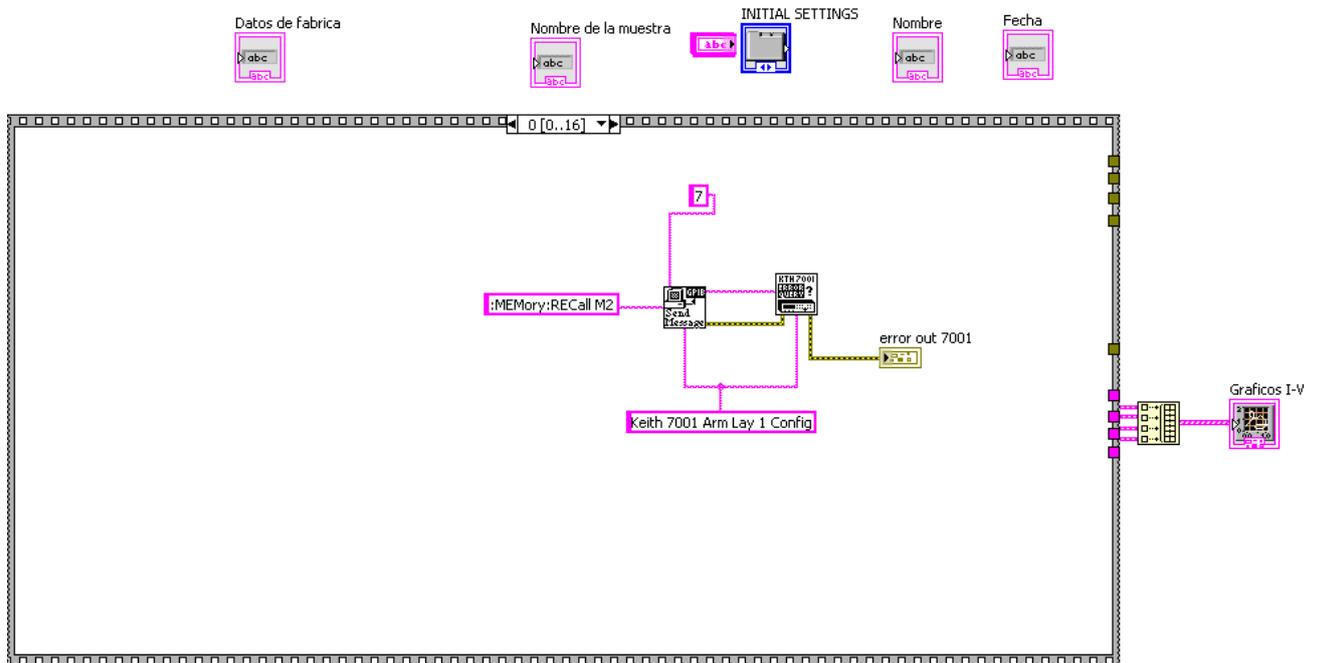
Figura 39 vista del panel frontal curvas I-V :



En la cual se pueden observar los datos de entrada que son las corrientes inyectadas y los ajustes de los instrumentos y el termopar. Y los gráficos de salida de la temperatura el voltaje y la corriente y las graficas I-V

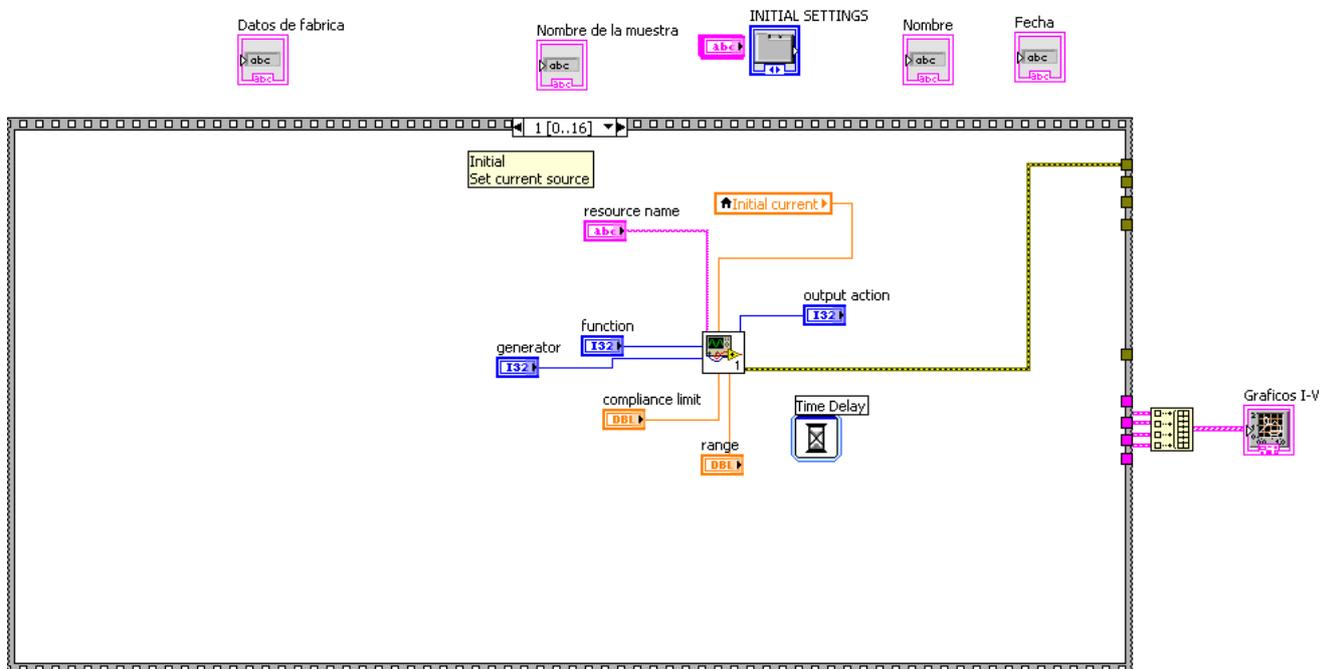
También presentamos el diagrama de bloques en el cual se muestran las estructuras de la secuencia (stacked), se muestran unicamente los 4 primeros marcos con sus códigos que se repiten salvo el 16 que es el de cierre, que también se presenta

Figura 40 Marco 0 de la estructura secuencia (stacked)



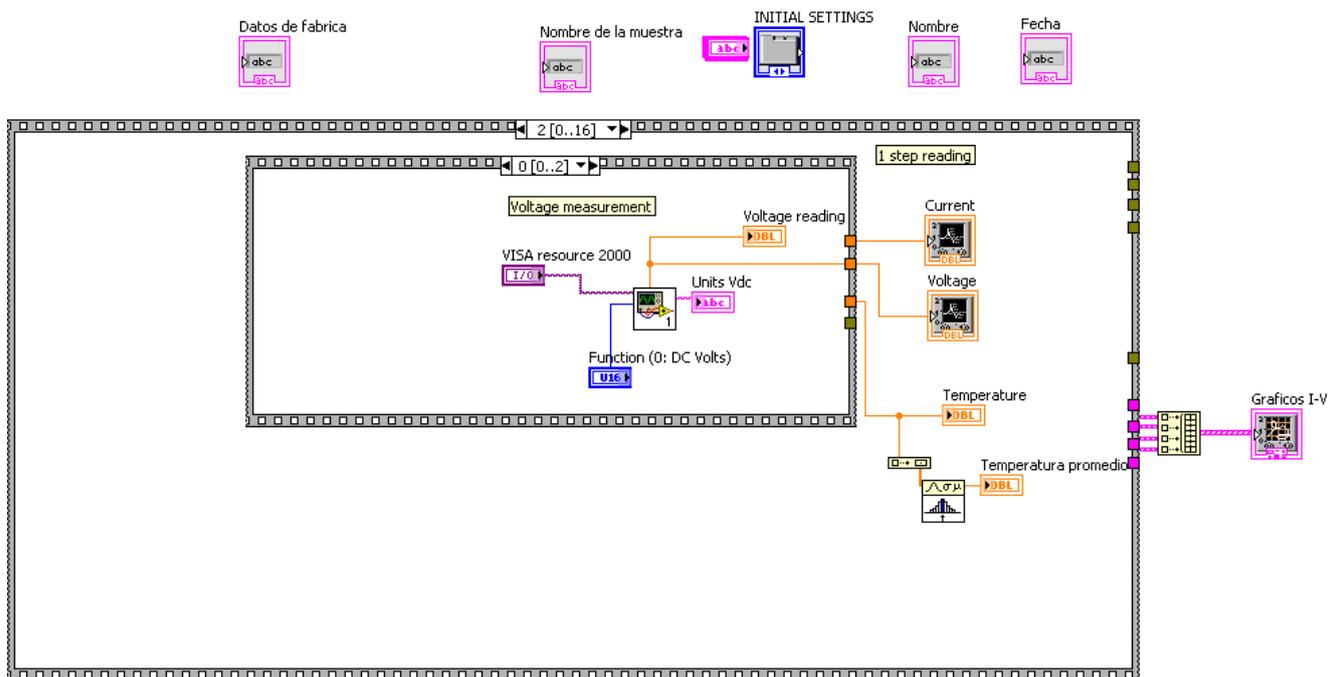
En el que se opera la memoria M2 del 7001

Figura 41 Marco 1



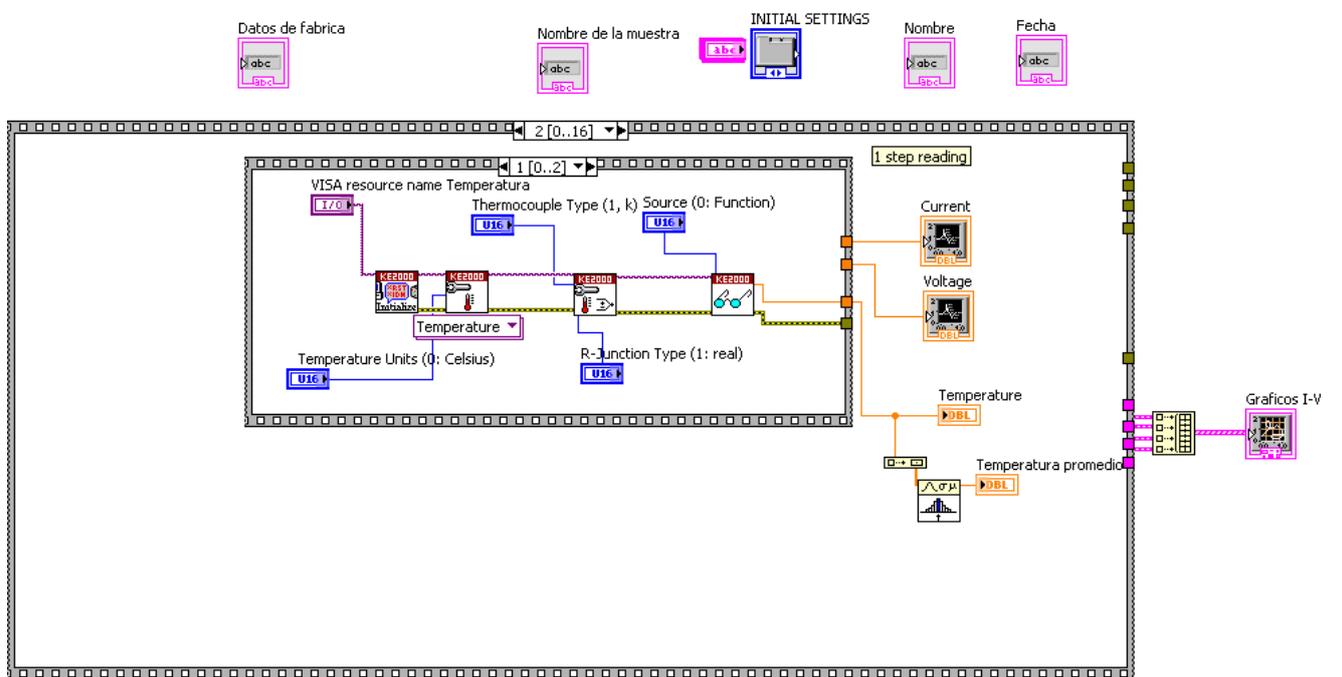
En el que se fija la corriente inicial inyectada por el 6220

Figura 42 Marco 2 con submarco 0



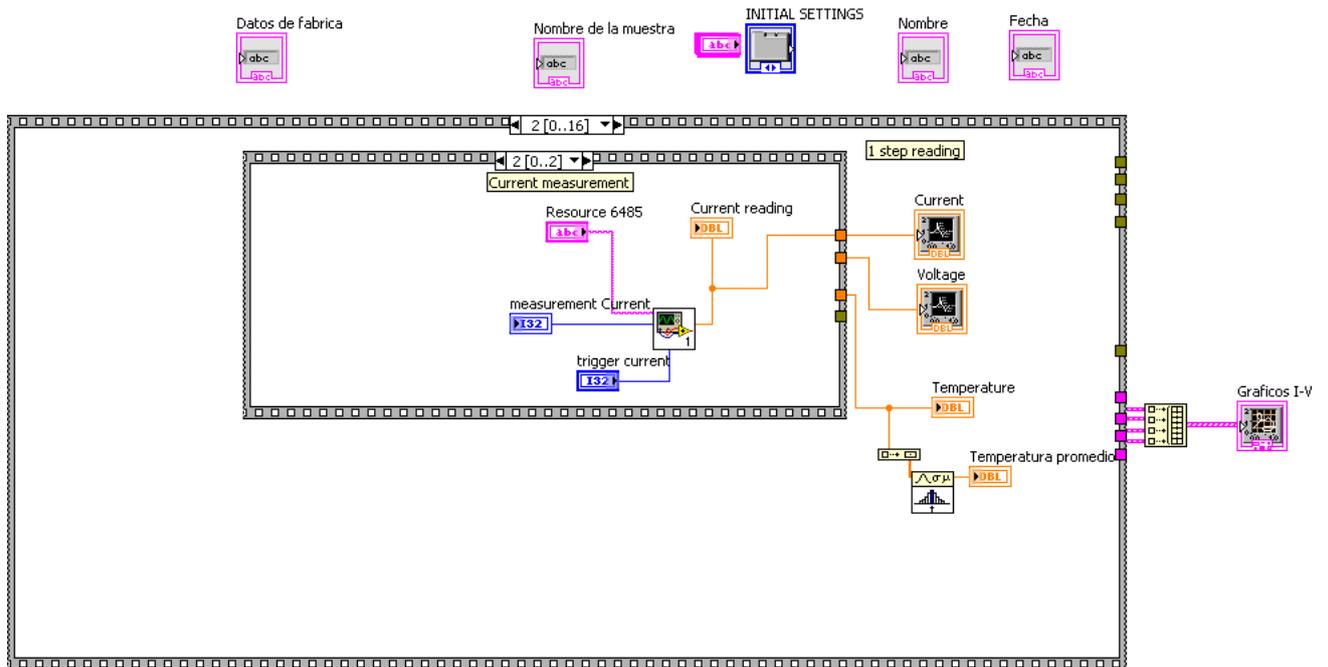
En el que se muestra la medición de voltaje y su grafico contra el tiempo

Figura 43 Marco 2 con submarco 1



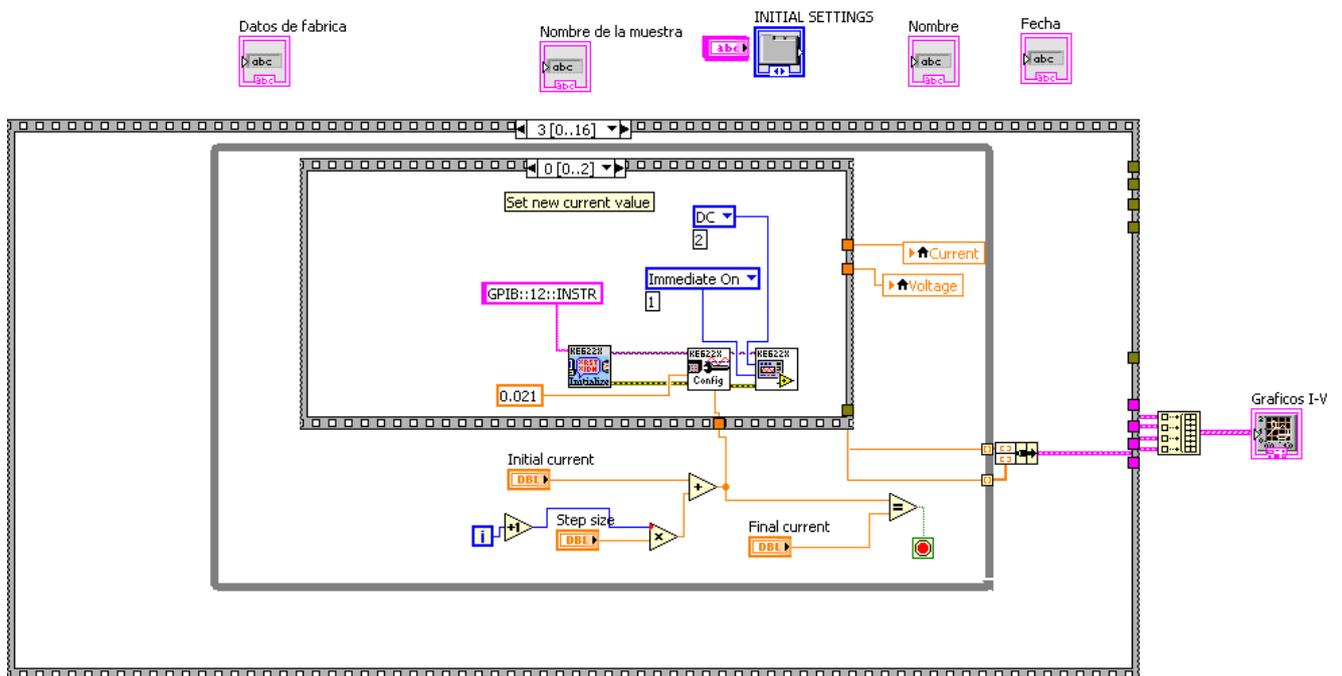
En el que se muestra la medición de temperatura y su grafico

Figura 44 Marco 2 con submarco 2



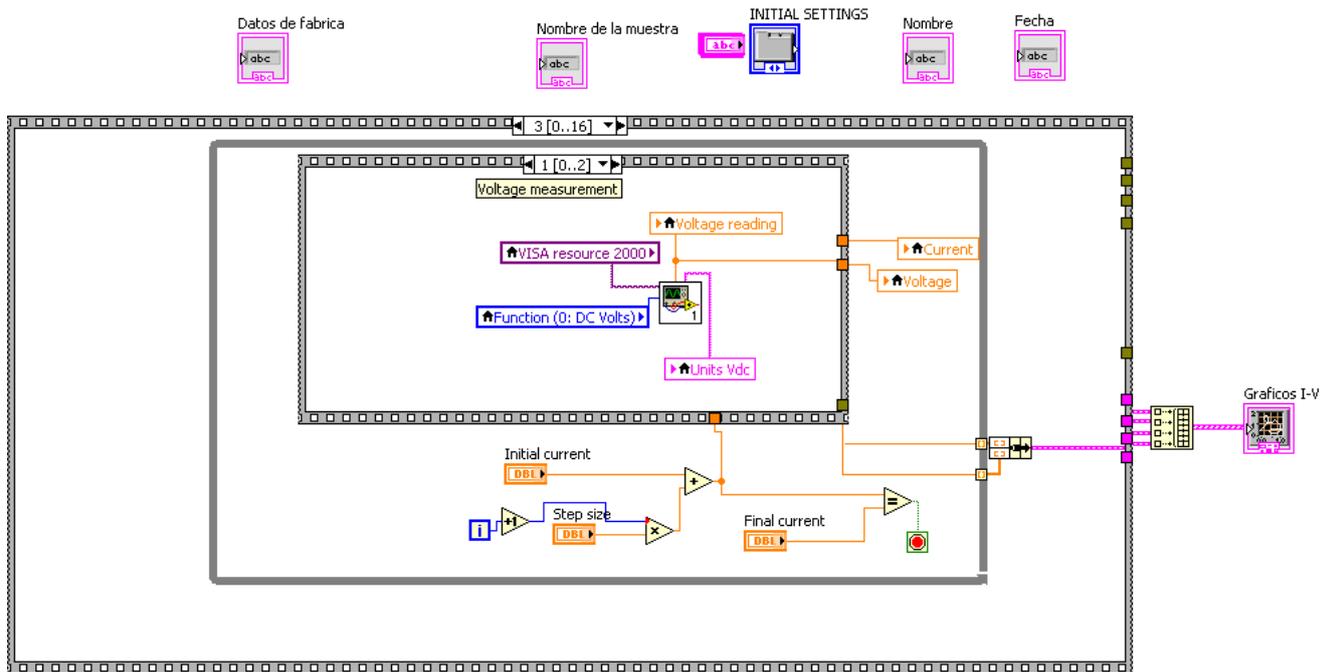
En el que se muestra la medición de corriente y su gráfica.

Figura 45 Marco 3 con submarco 0



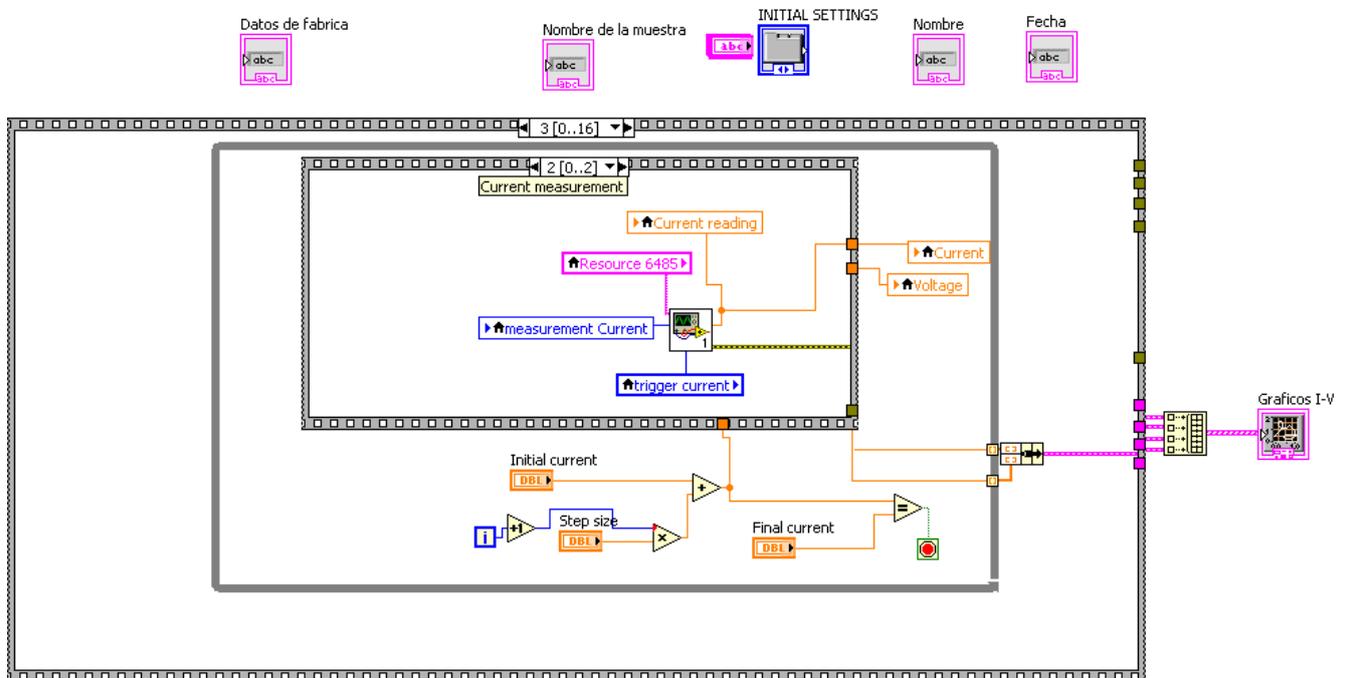
En la que se muestra la inyección de corriente en escalera de $\pm 5\text{ma}$ con escalones de 1 ma

Figura 46 Marco 3 submarco 1



Se observa la medición de voltaje y la alimentación de medidas a los gráficos I-V correspondientes a la posición M2.

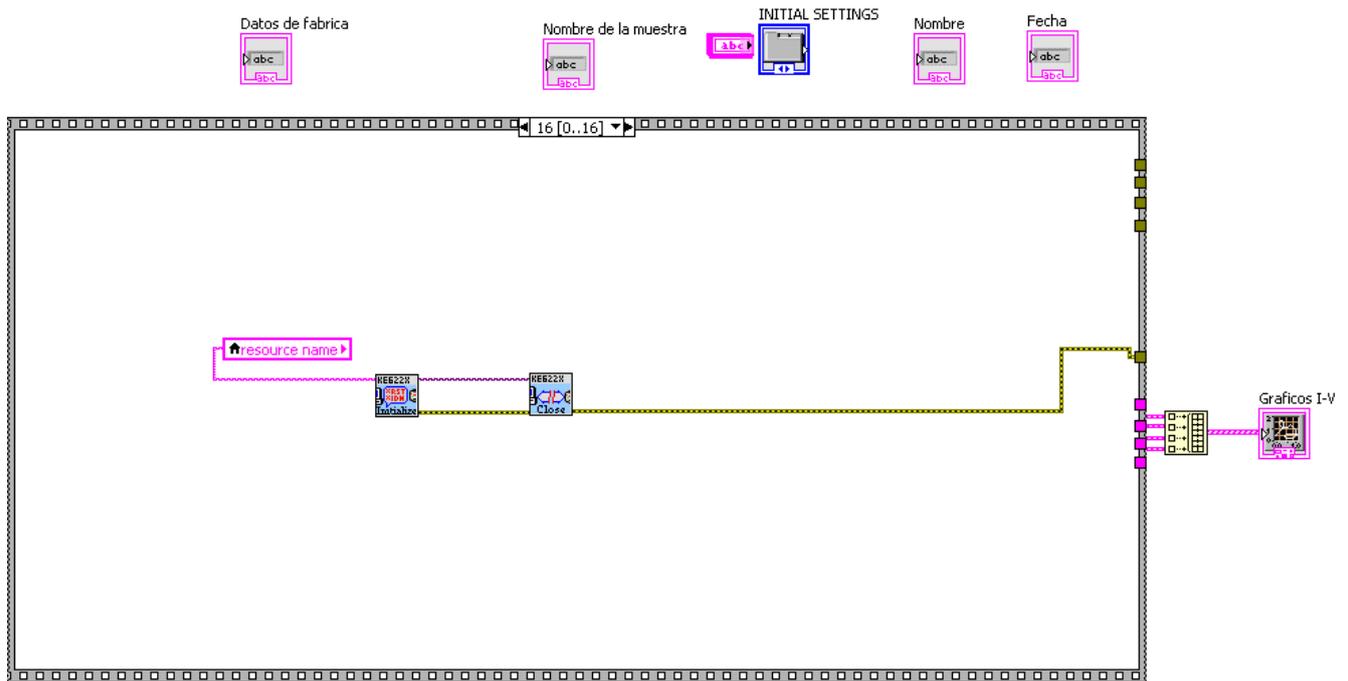
Figura 47 Marco 3 submarco 2



Se puede ver la medición de corriente y el flujo de datos al grafico I-V para la posición M2

En los marcos del 4 al 15 se repiten los mismos códigos únicamente cambiando las posiciones a M4, M6, Y M8.

Figura 48 El último marco 16

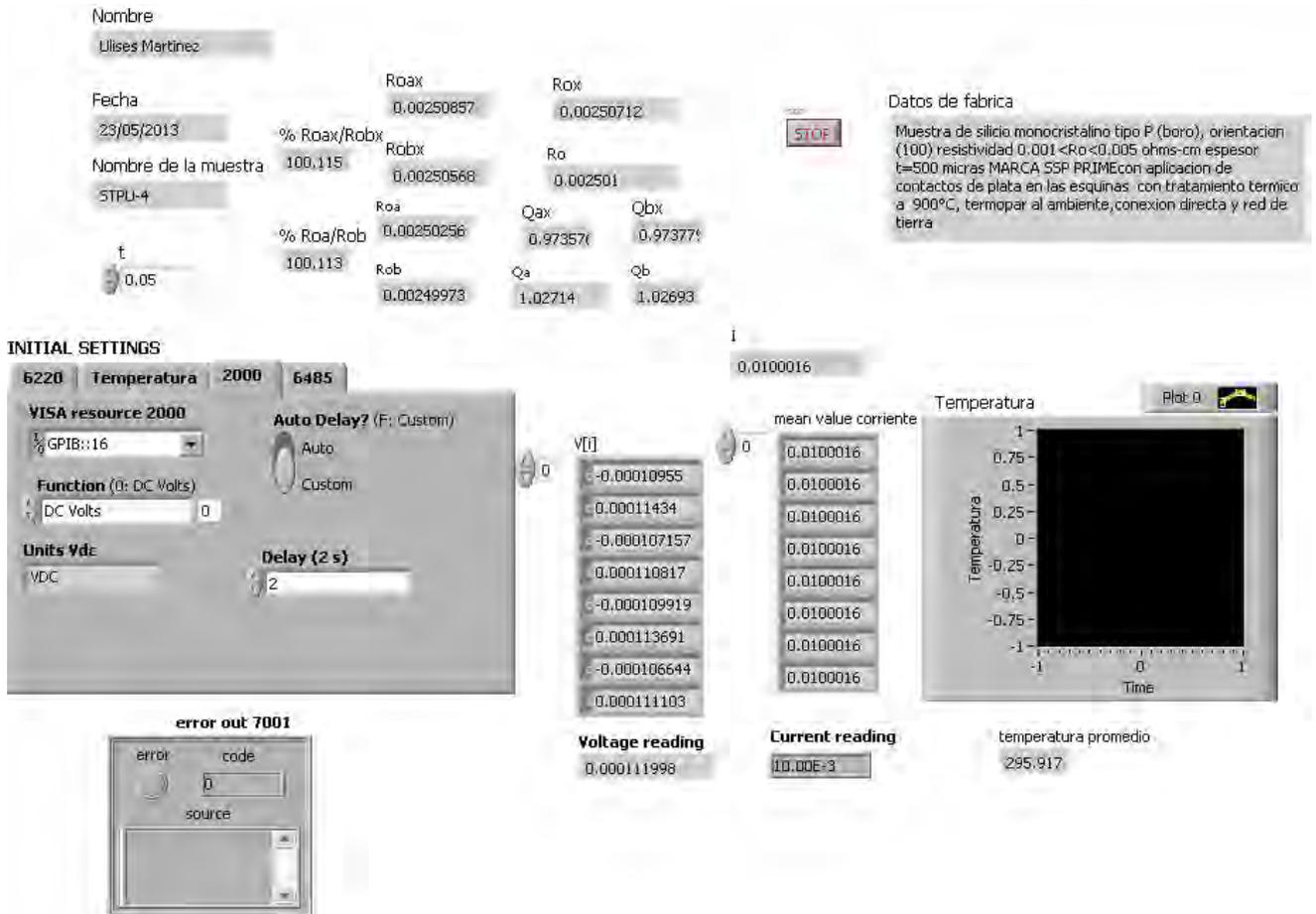


Es el del cierre y suspensión de la inyección.

4.3.4 DISEÑO DEL VI PARA LA MEDICION Y CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD

Se presenta el panel frontal del VI

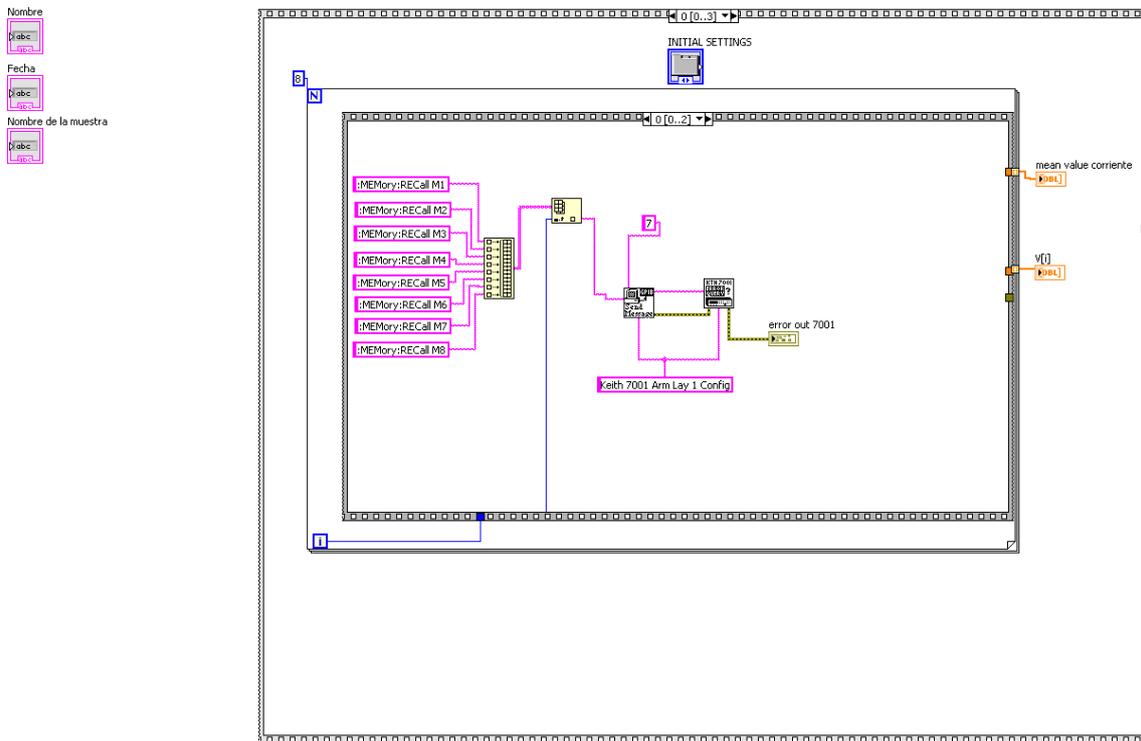
Figura 49 panel frontal del VI resistividad



En el que se observa los ajustes de los instrumentos y el termopar y el valor del espesor de la muestra t en cm como datos de entrada y el valor de la resistividad y la temperatura media como datos de salida

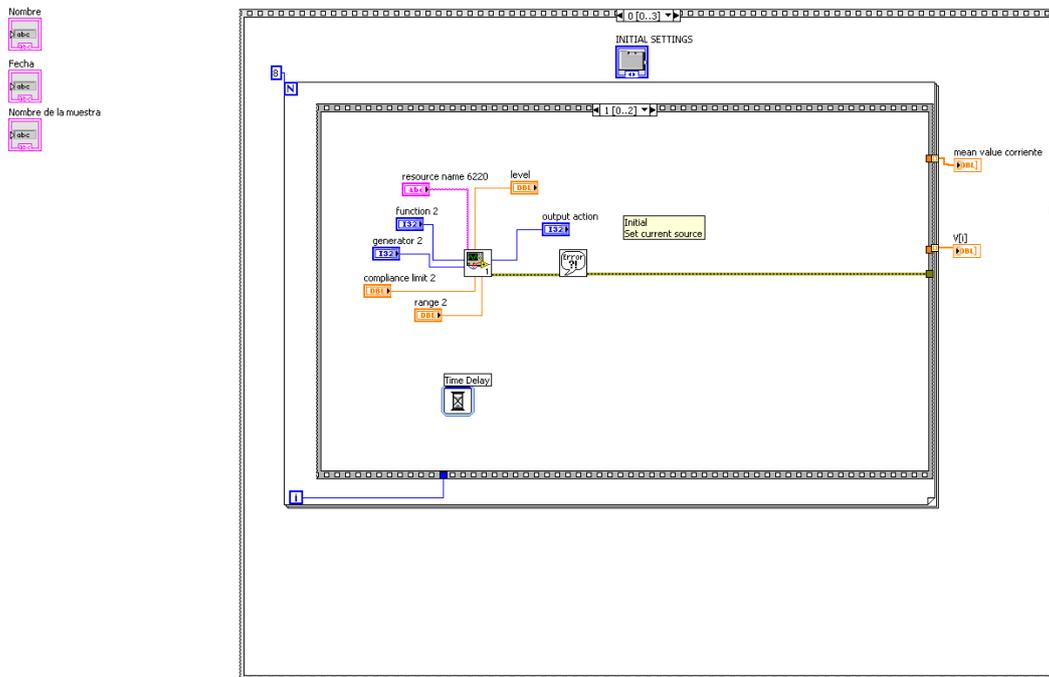
En este VI el diseño fue diferente porque nada más se usaron 4 marcos de la estructura secuencia (stacked)

Figura 50 El primer marco 0 de la estructura secuencia (stacked), submarco 0, dentro de una estructura For



En el que podemos ver la operación de conmutación del 7001 a las posiciones M1, M2, M3,M4, M5,M6,M7,y M8 según la tabla de resistividad del apartado 7.1.4

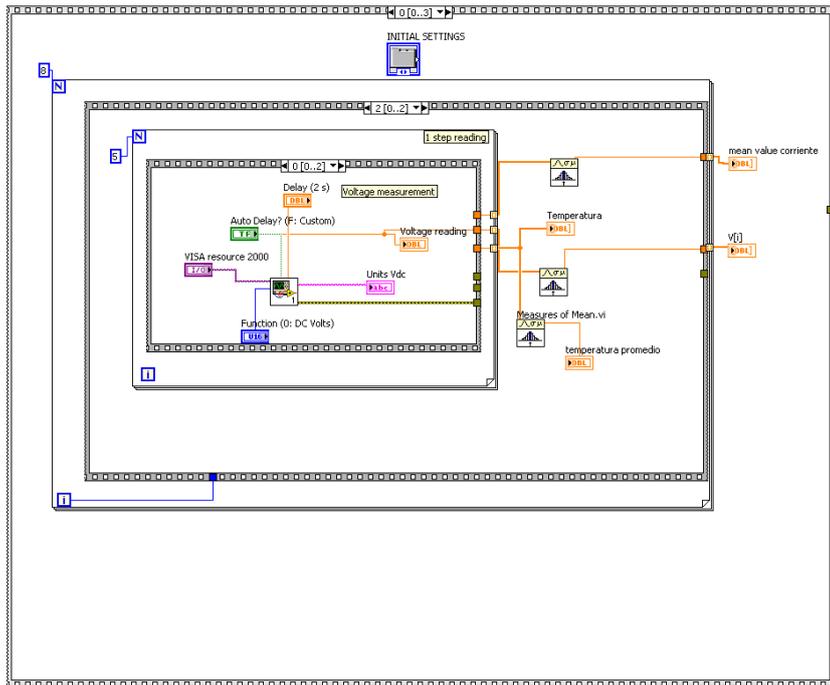
Figura 51 El marco 0 con el submarco 1



Se observa el ajuste de la corriente de inyección en el 6220

Figura 52 Marco 0, 1er submarco 2,

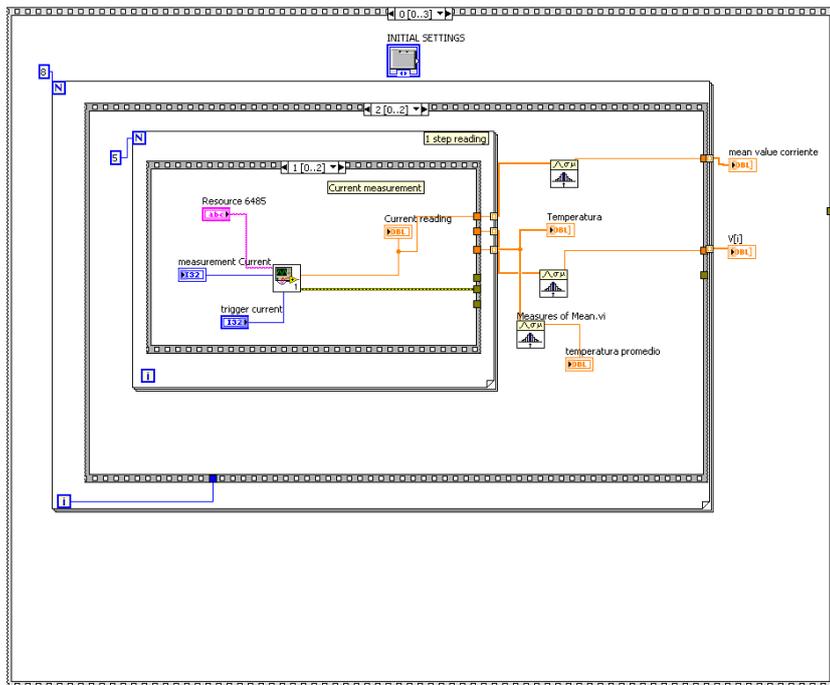
Nombre
 [abc]
 Fecha
 [abc]
 Nombre de la muestra
 [abc]



El 2º submarco encerrado en una estructura For para la toma de 5 lecturas de voltaje y el cálculo de sus promedio datos que integran el arreglo (array) V [i]

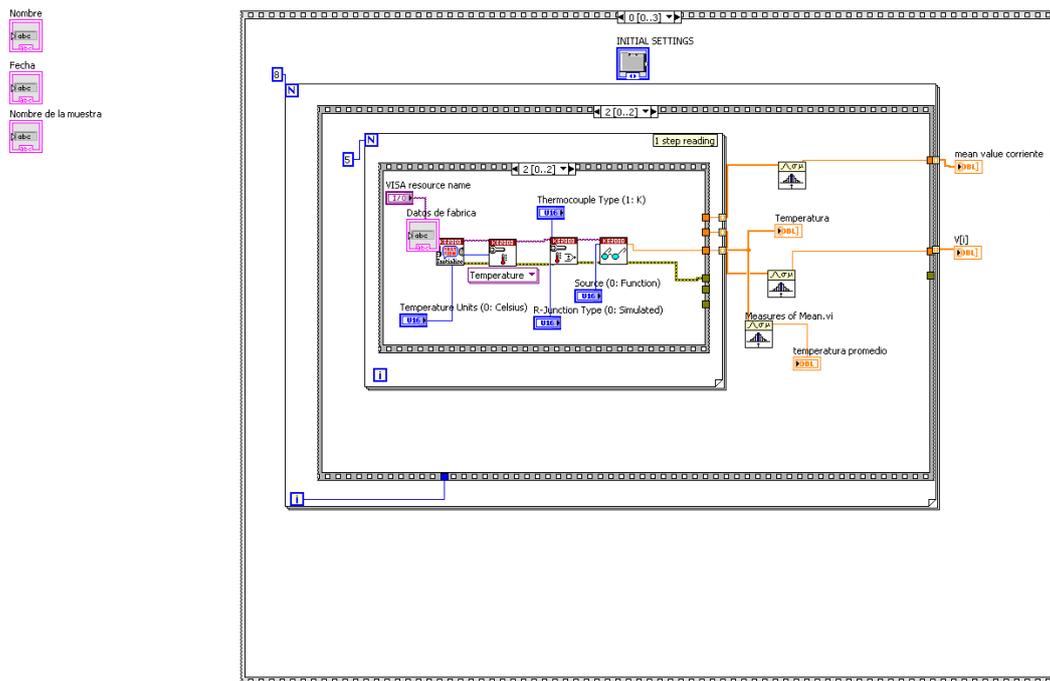
Figura 53 Marco 0, 1er submarco2 ,2º submarco 1

Nombre
 [abc]
 Fecha
 [abc]
 Nombre de la muestra
 [abc]



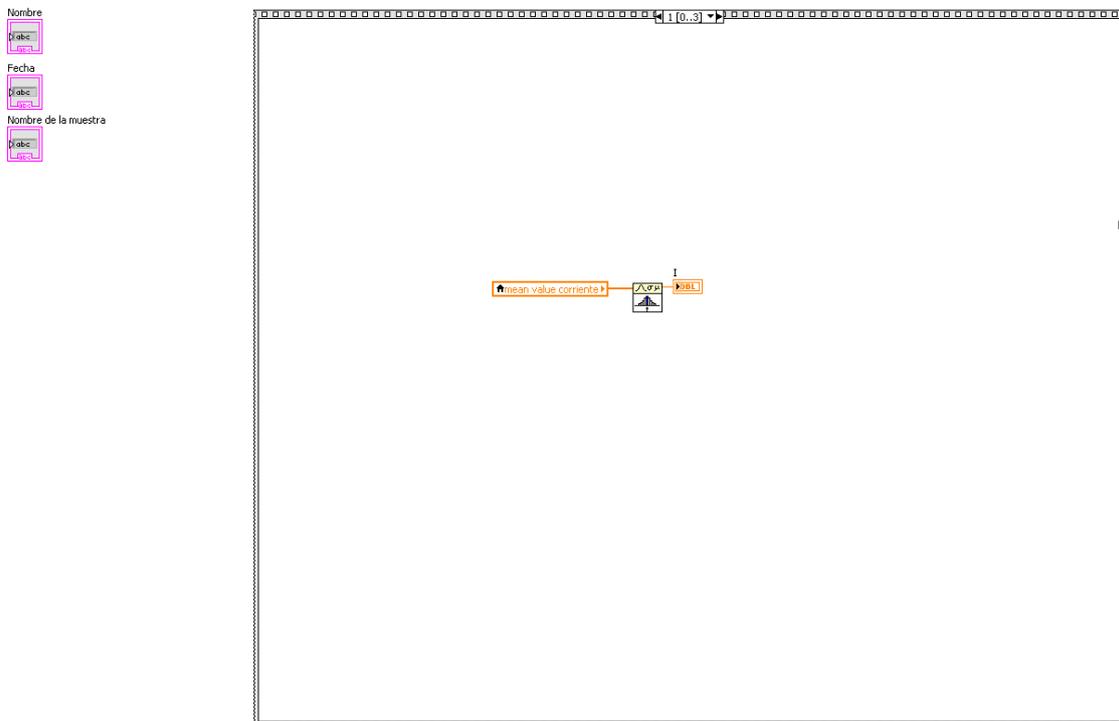
En el que podemos ver las 5 lecturas de corriente y sus promedios que a su vez se promedian para obtener el valor de I

Figura 54 Marco 0, 1er submarco 2, 2º submarco 2



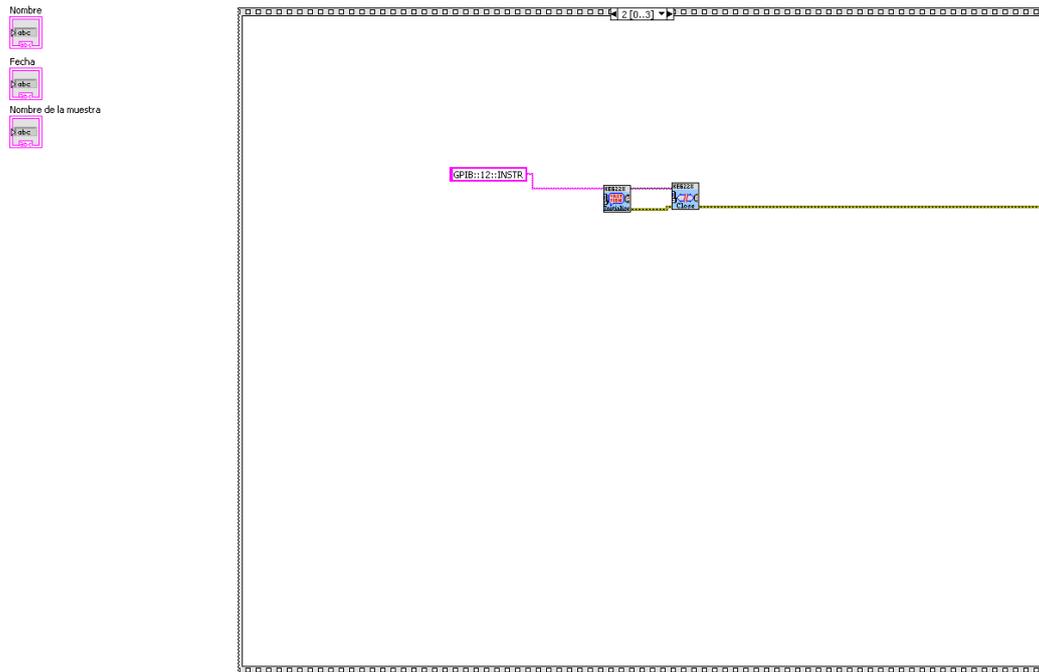
Se observa la medición de la temperatura y su promedio

Figura 55 El marco 1 de la secuencia



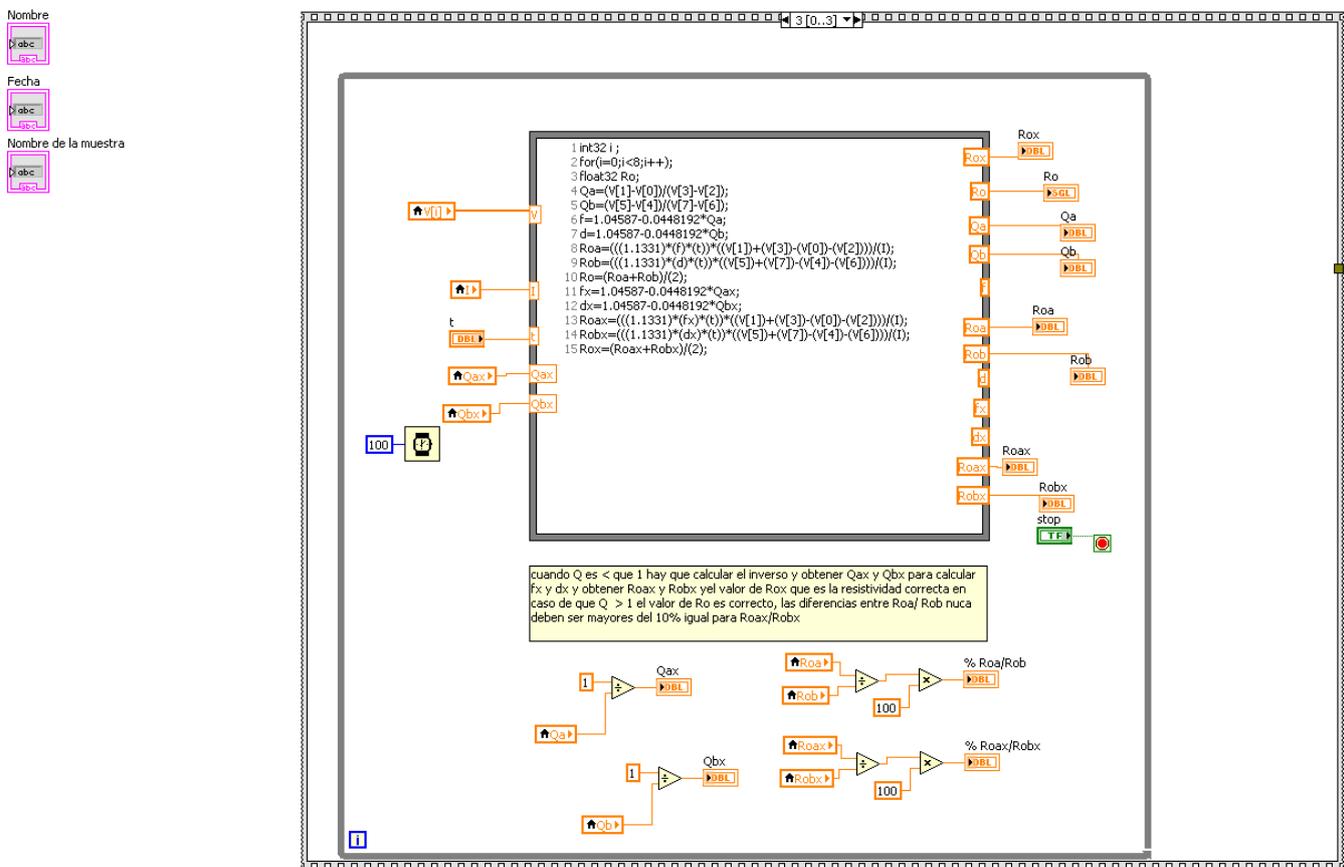
Corresponde al promedio de la corrientes medidas en todas las posiciones M

Figura 56 El marco 2 de la secuencia



Se refiere al cierre y suspensión de la inyección de la fuente 6220

Figura 57 El marco 3 de la secuencia es el que corresponde al cálculo de la resistividad



Y contiene el formula node de labview para el cálculo de la resistividad con los datos de entrada del arreglo de voltajes medidos V[i], el valor de la corriente promedio I y el espesor de la muestra t las fórmulas que se utilizan son las recomendadas por la norma ASTM-76 y la salida es el valor de la resistividad de la muestra, aquí vale la pena observar que como la ecuación que relaciona los valores de Q con f es compleja $\left(\frac{-1+Qa}{1+Qa} == 1.443001443001443f \text{ArcCosh}\left[\frac{e^{0.693/f}}{2}\right]\right)$ y no se pudo despejar la f, se obtuvo la aproximación lineal **1.04587-0.0448192 x** que es la que está en la formula node para el cálculo f y d por considerarlo de interés mostramos el proceso de aproximación lineal o linear fit.

Aproximación lineal de f

Mathematica

Mathematica

```
fr3=Table[FindRoot[(-1+Qa)/(1+Qa)=1.44300144300144` f ArcCosh[e0.693/f/2],{f,1}],{Qa,1,6,0.1}]
// Chop
```

```
{{f→0.999788},{f→0.999001},{f→0.996918},{f→0.993866},{f→0.99009},{f→0.985777},{f→0.981066},
{f→0.976065},{f→0.970859},{f→0.965512},{f→0.960076},{f→0.954591},{f→0.949087},
{f→0.94359},{f→0.938119},{f→0.932689},{f→0.927312},{f→0.921997},{f→0.916751},
{f→0.91158},{f→0.906486},{f→0.901474},{f→0.896544},{f→0.891698},{f→0.886936},{f→0.882258},
{f→0.877664},{f→0.873154},{f→0.868725},{f→0.864377},{f→0.860109},{f→0.85592},
{f→0.851807},{f→0.84777},{f→0.843806},{f→0.839914},{f→0.836093},{f→0.832341},
{f→0.828656},{f→0.825036},{f→0.821481},{f→0.817988},{f→0.814555},{f→0.811183},
{f→0.807868},{f→0.80461},{f→0.801406},{f→0.798257},{f→0.795159},{f→0.792113},
{f→0.789116}}
```

```
Length[fr3]
```

```
51
```

```
qs3=Table[i,{i,1,6,0.1}]
```

```
{1.,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2.,2.1,2.2,2.3,2.4,2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3.,3.1,3.2,3.3,3.4,3.5,
3.6,3.7,3.8,3.9,4.,4.1,4.2,4.3,4.4,4.5,4.6,4.7,4.8,4.9,5.,5.1,5.2,5.3,5.4,5.5,5.6,5.7,5.8,5.9,6.}
```

```
efes3=Table[f /. fr3[[i]],{i,1,Length[qs3]}]
```

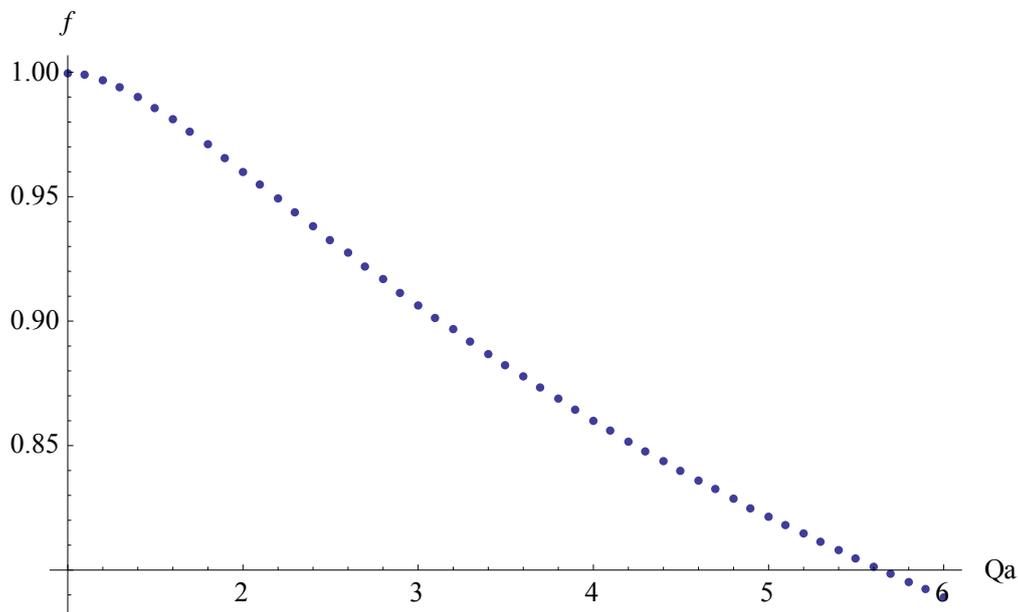
```
{0.999788,0.999001,0.996918,0.993866,0.99009,0.985777,0.981066,0.976065,0.970859,0.965512,0.960076,0.954591,0.949087,0.94359,0.938119,0.932689,0.927312,0.921997,0.916751,0.91158,0.906486,0.901474,0.896544,0.891698,0.886936,0.882258,0.877664,0.873154,0.868725,0.864377,0.860109,0.85592,0.851807,0.84777,0.843806,0.839914,0.836093,0.832341,0.828656,0.825036,0.821481,0.817988,0.814555,0.811183,0.807868,0.80461,0.801406,0.798257,0.795159,0.792113,0.789116}
```

```
graf3=Table[{qs3[[i]],efes3[[i]]},{i,1,Length[qs3]}
```

```
{{1.,0.999788},{1.1,0.999001},{1.2,0.996918},{1.3,0.993866},{1.4,0.99009},{1.5,0.985777},{1.6,0.981066},{1.7,0.976065},{1.8,0.970859},{1.9,0.965512},{2.,0.960076},{2.1,0.954591},{2.2,0.949087},{2.3,0.94359},{2.4,0.938119},{2.5,0.932689},{2.6,0.927312},{2.7,0.921997},{2.8,0.916751},{2.9,0.91158},{3.,0.906486},{3.1,0.901474},{3.2,0.896544},{3.3,0.891698},{3.4,0.886936},{3.5,0.882258},{3.6,0.877664},{3.7,0.873154},{3.8,0.868725},{3.9,0.864377},{4.,0.860109},{4.1,0.85592},{4.2,0.851807},{4.3,0.84777},{4.4,0.843806},{4.5,0.839914},{4.6,0.836093},{4.7,0.832341},{4.8,0.828656},{4.9,0.825036},{5.,0.821481},{5.1,0.817988},{5.2,0.814555},{5.3,0.811183},{5.4,0.807868},{5.5,0.80461},{5.6,0.801406},{5.7,0.798257},{5.8,0.795159},{5.9,0.792113},{6.,0.789116}}
```

```
lp3=ListPlot[graf3, AxesLabel→{Qa,f}],
```

Figura 58 grafica de f vs Q

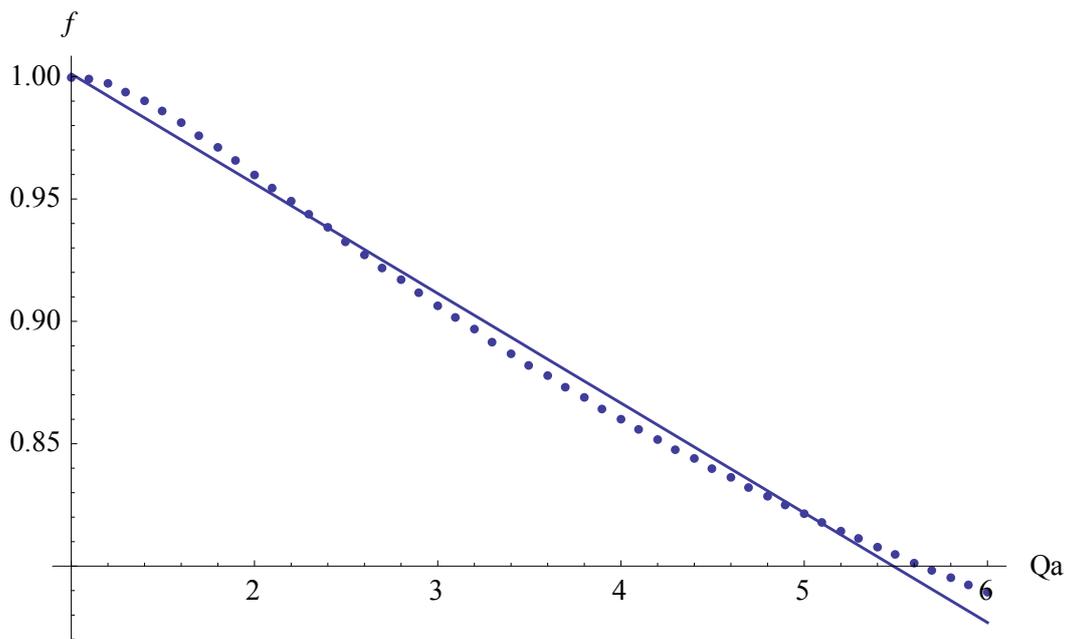


```
eqf13=Fit[graf3,{1,x},x]
```

```
1.04587-0.0448192 x
```

```
Show[lp3,Plot[eqf13,{x,1,6}]]
```

Figura 59 aproximación lineal

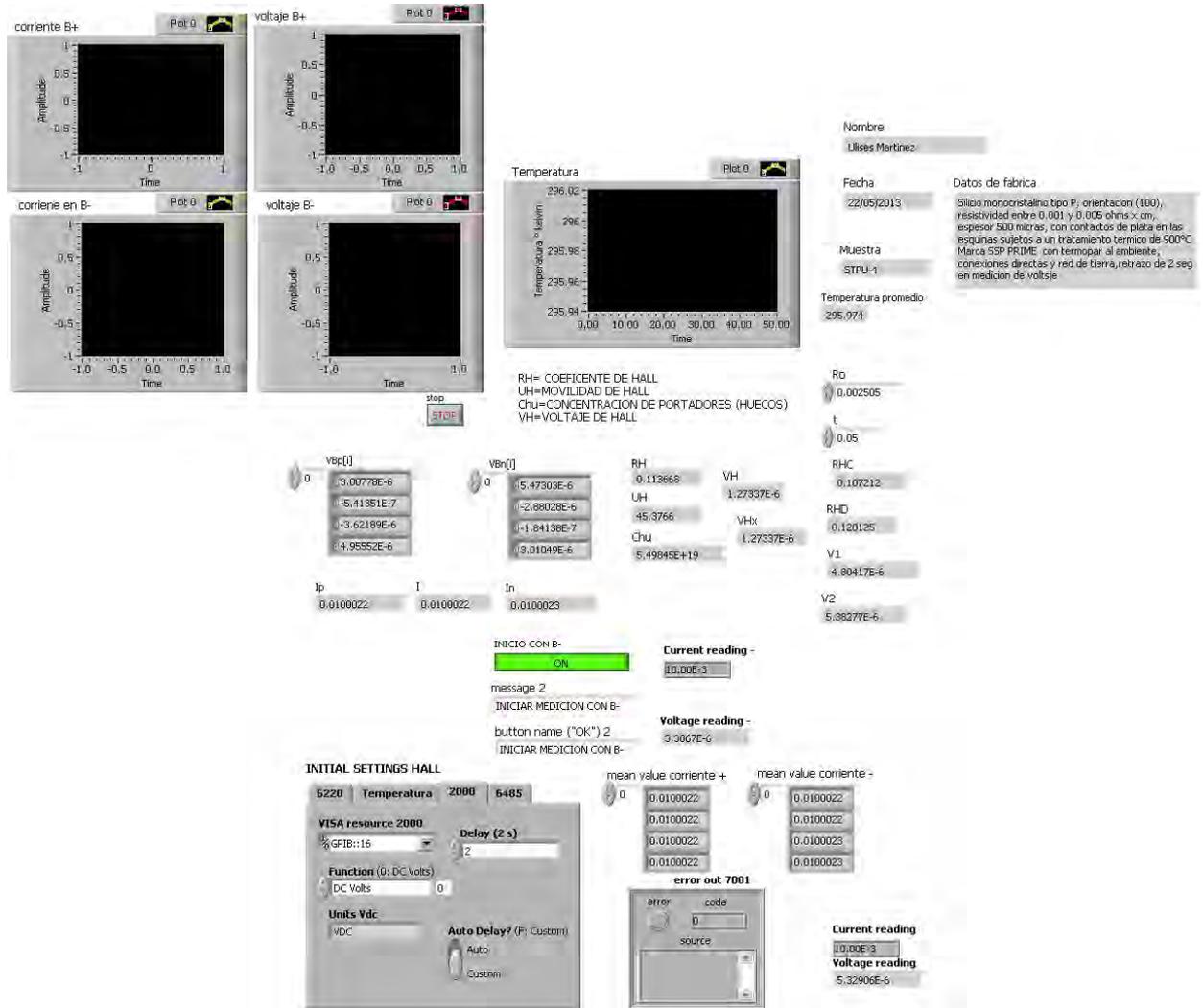


Se observa que esta aproximación lineal o (linear fit) tiene muy poco error y puede ser considerada para insertarla en el formula node y si los valores de $Q > 1$ los valores de R_o son verdaderos por lo tanto escogemos e insertamos **$f=1.04587-0.0448192 Q_a$**

y **$d=1.04587-0.0448192 Q_b$** , en caso de que los valores de $Q < 1$ como dice la norma obtener el inverso y con esos valores obtener nuevos valores para f_x y d_x y obtener un nuevo valor de R_{ox} que es el verdadero.

4.3.5 DISEÑO DEL VI PARA LA MEDICION Y CÁLCULO DEL VOLTAJE Y EL COEFICIENTE DE HALL

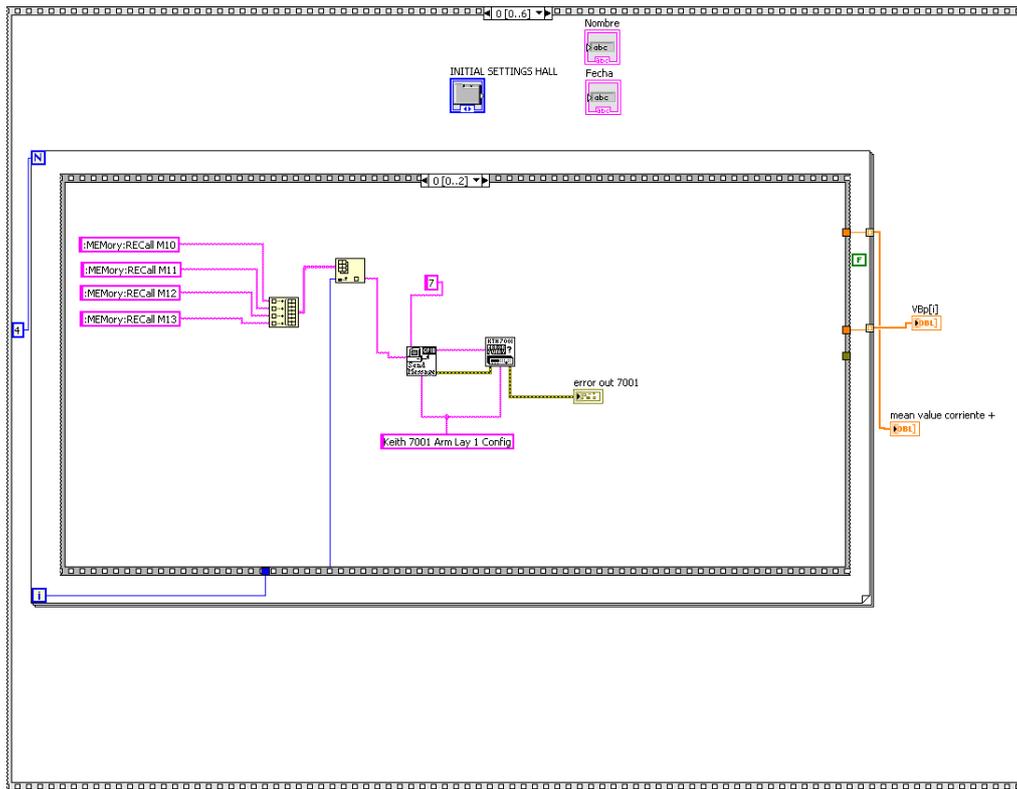
Figura 60 El panel frontal del VI para Hall



Este panel frontal tiene como datos el espesor de la muestra t el valor de la resistividad R_o y los ajustes de los instrumentos y como salidas el gráfico de temperatura la temperatura media el valor del coeficiente de Hall R_H y el voltaje de Hall V_H la movilidad μ_H y la concentración de portadores (huecos ó electrones) C_{HU} , vale la pena observar que se dio un retraso de 2 seg para las lecturas de voltaje para permitir la estabilización por efecto de la capacitancia de los circuitos

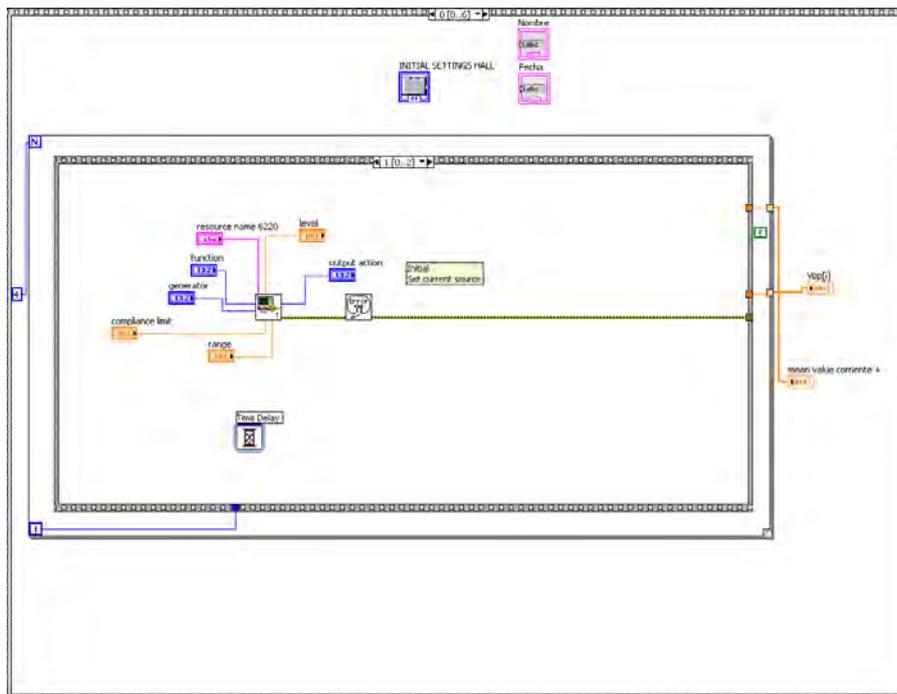
El diagrama de bloques también se diseña con una estructura tipo secuencia (stacked) de 6 marcos y mostramos en la siguiente:

Figura 61 el marco 0 , sub marco 0



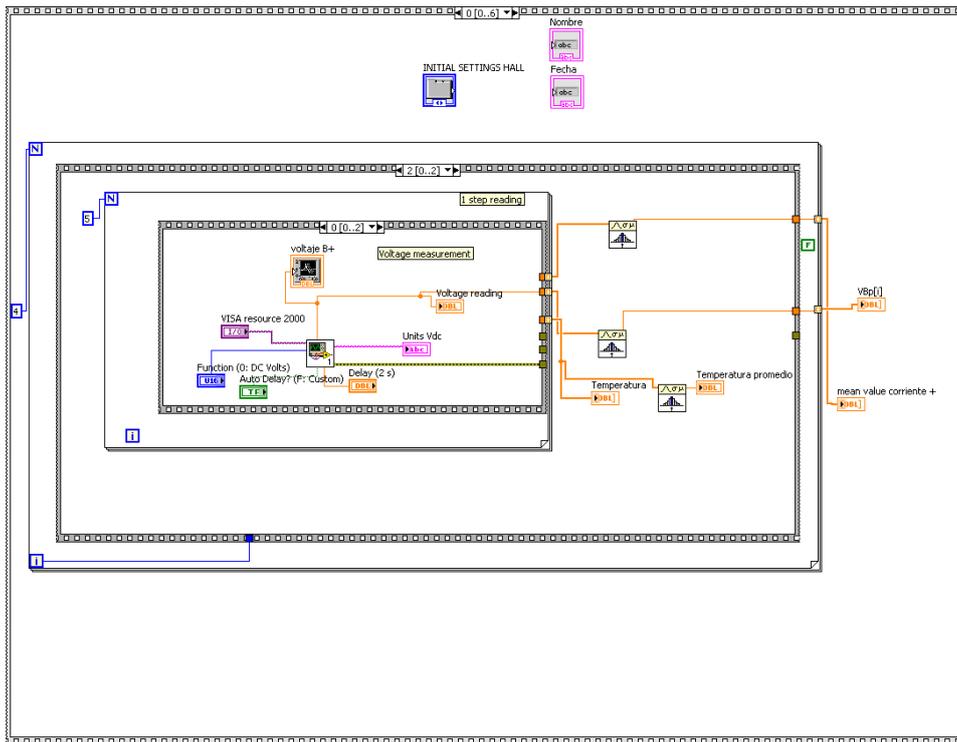
Que nos muestra las operaciones de conmutación para las memorias M10, M11, M12, M13 con el campo en B+ (Dirección N → S).

Figura 62 El marco 0 sub marco 1



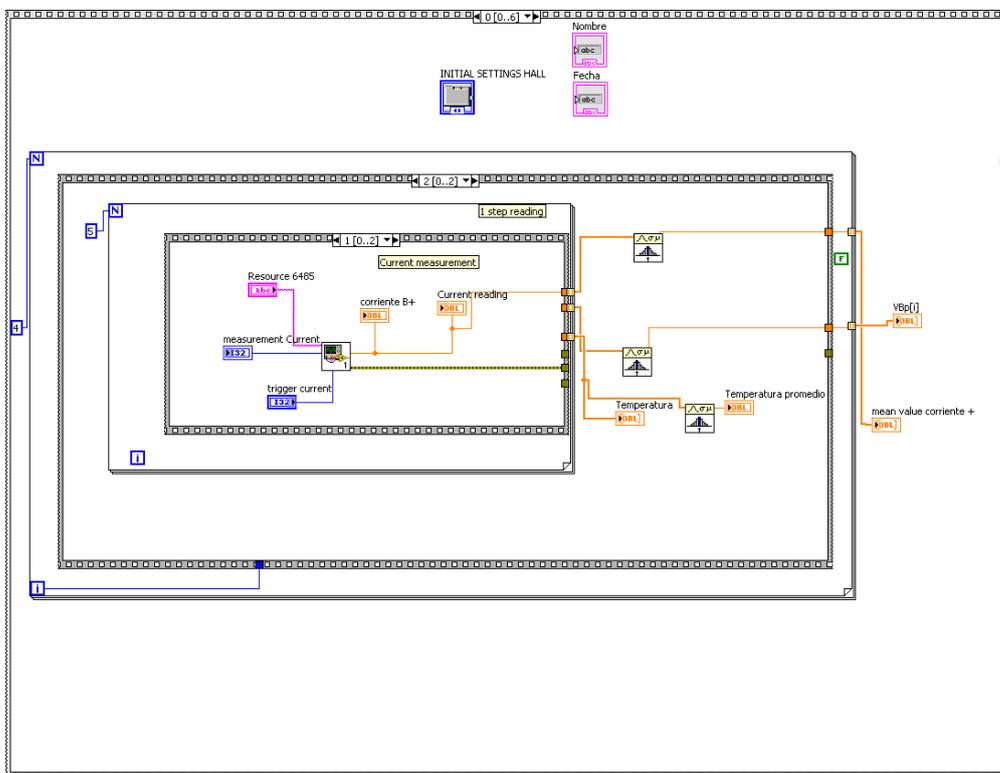
El ajuste de la corriente de inyección.

Figura 63 El marco 0 1er sub marco 2, 2º sub marco 0



Nos presenta las mediciones de voltaje con sus promedios en todas las posiciones del conmutador con el campo en B+ para generar el arreglo VBp[i].

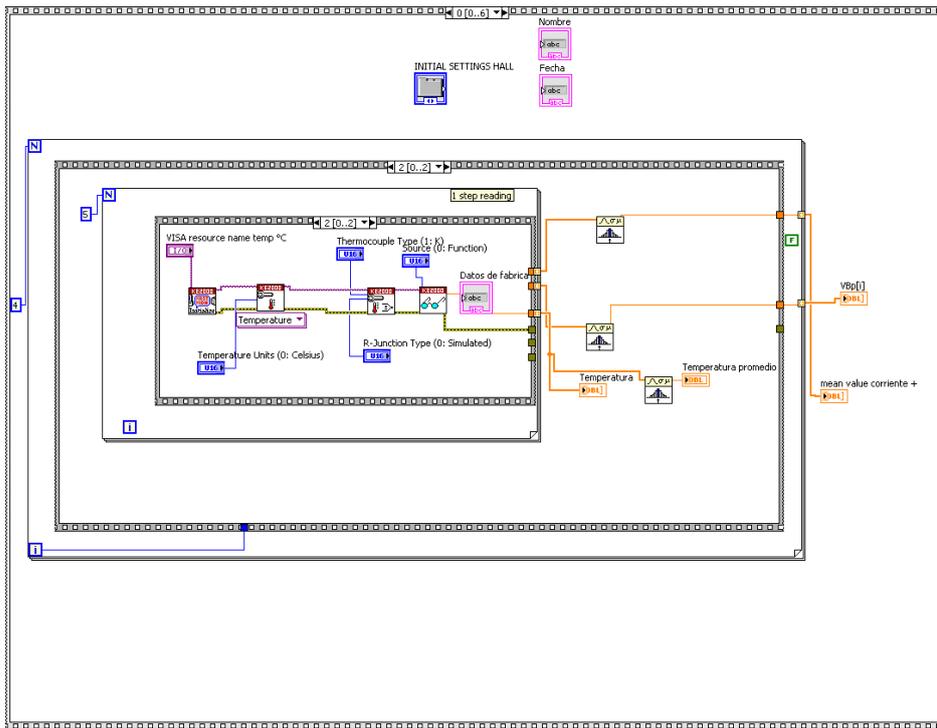
Figura 64 Marco 0 1er sub marco 2, 2º sub marco 1



Nos

muestra las corrientes y sus promedios en las posiciones del conmutador

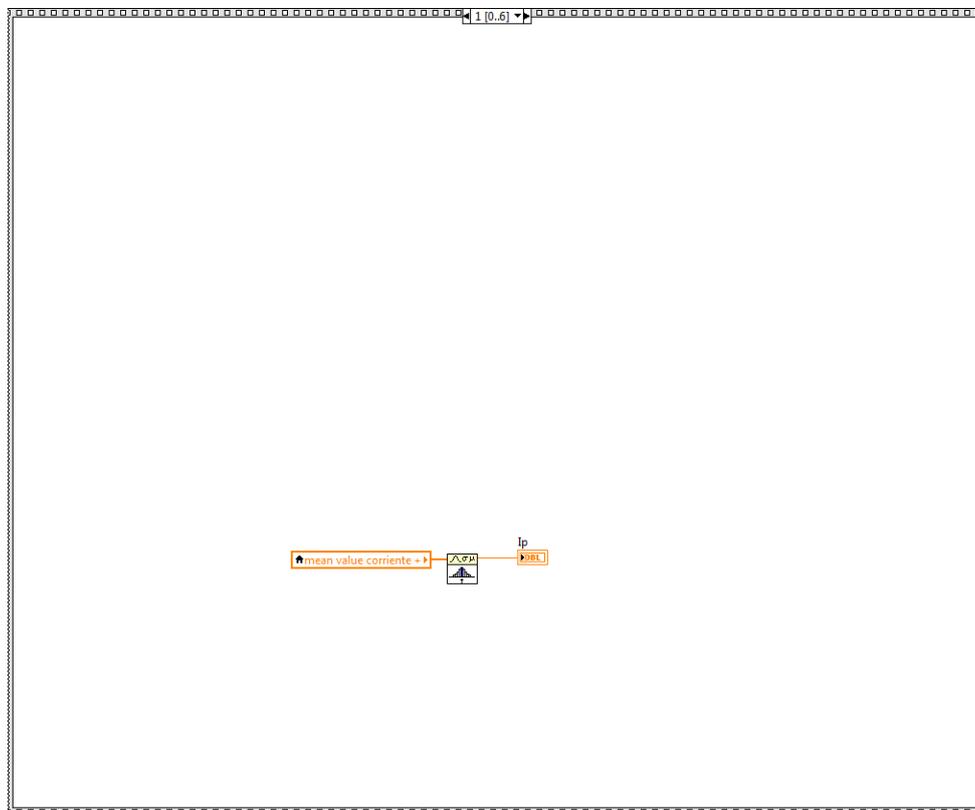
Figura 65 Marco 0 1er sub marco2 2º sub marco 2



Contiene las

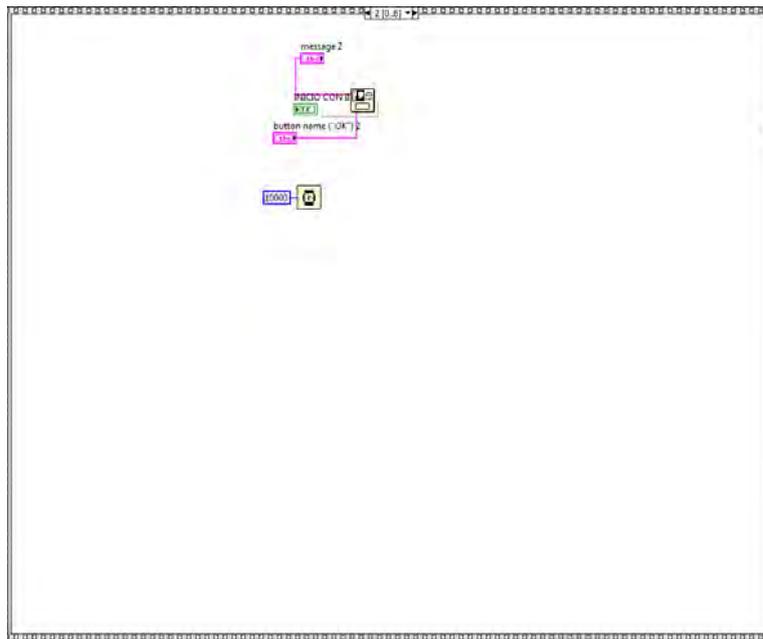
medidas de la temperatura y sus promedios,

Figura 66 Marco 1 Hall



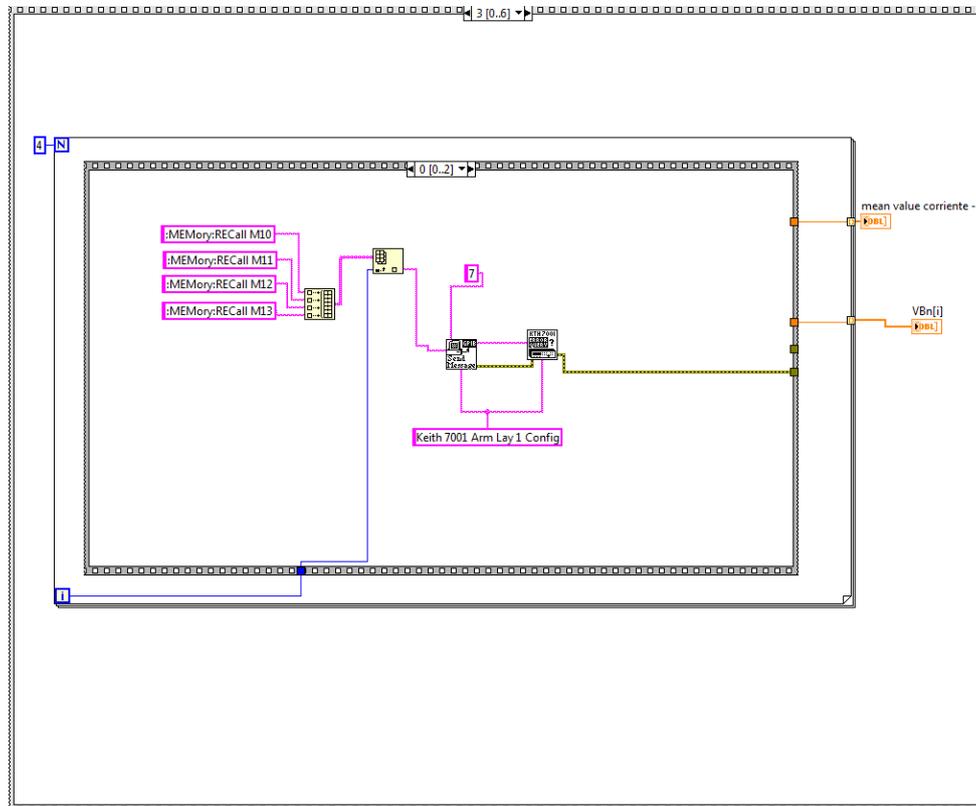
Calcula la corriente promedio I_p con el campo B+ ó p

Figura 67 Marco 2



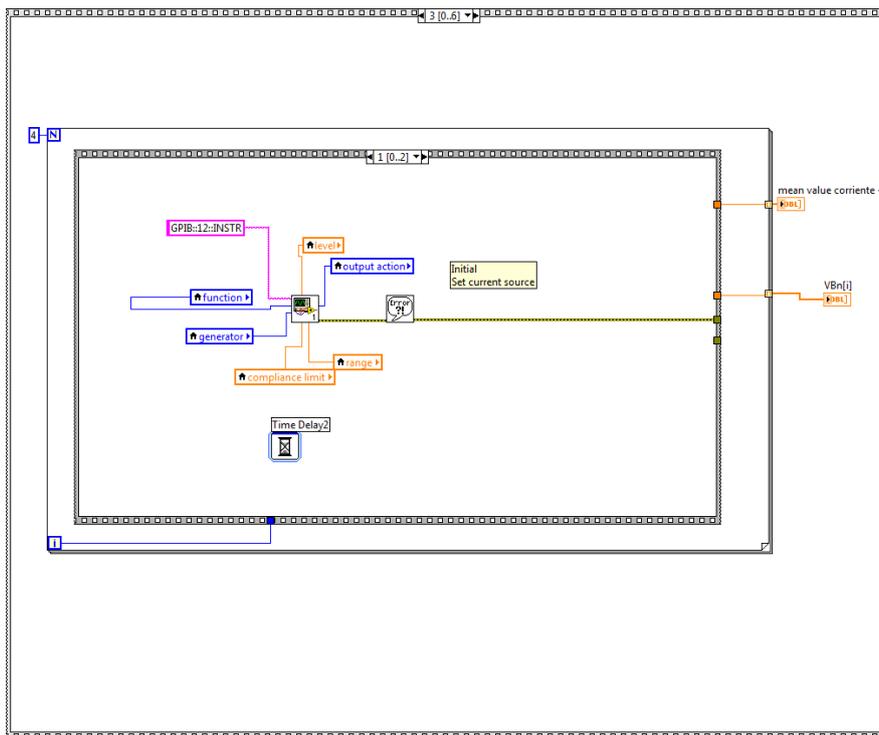
Envía el mensaje para cambiar manualmente la dirección del campo a B- ó S ► N

Figura 68 Marco 3 sub marco 0



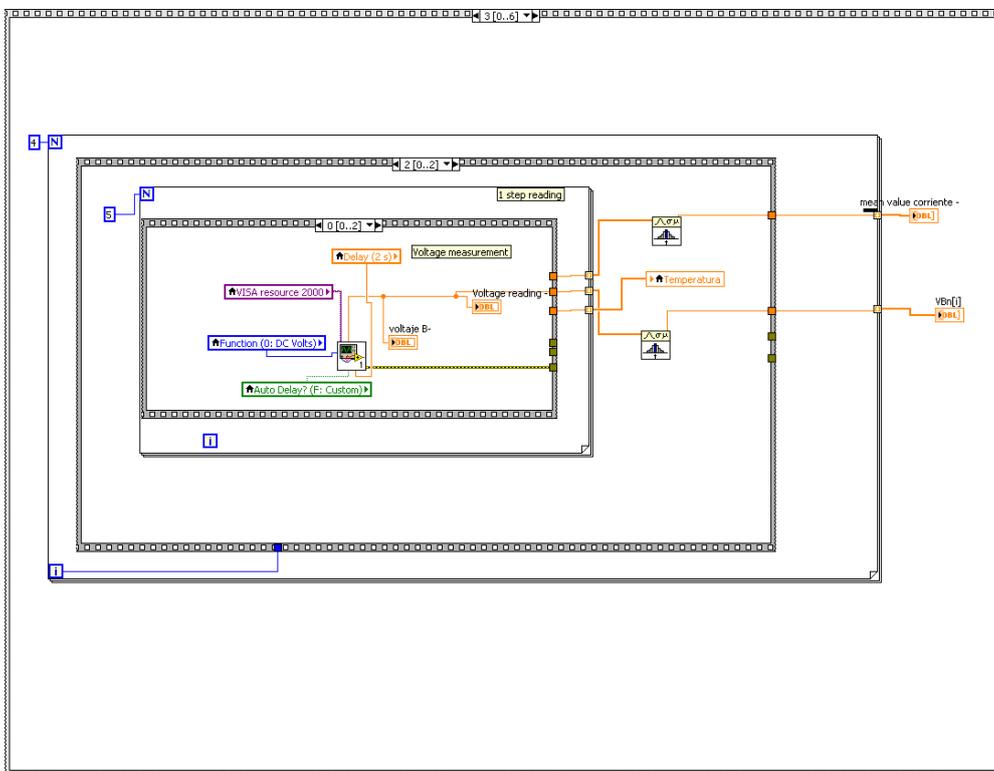
Repite el mismo código de conmutación pero con el campo en dirección B- ó n (S → N).

Figura 69 Marco 3, sub marco 1



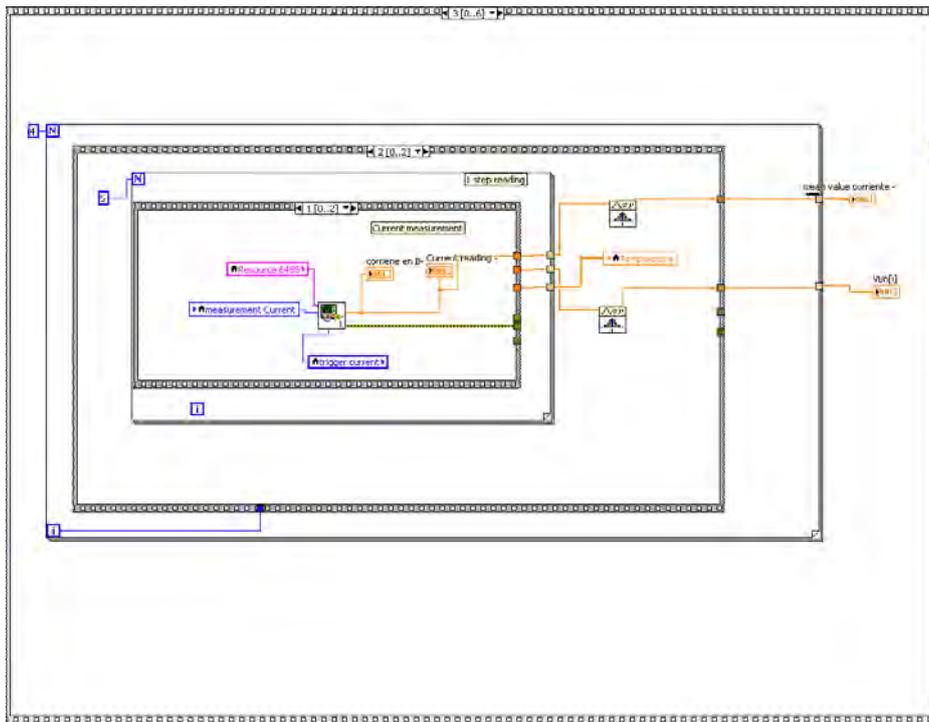
El ajuste de la inyección de la corriente con el campo B-

Figura 70 Marco 3 1er sub marco 2 2º sub marco 0



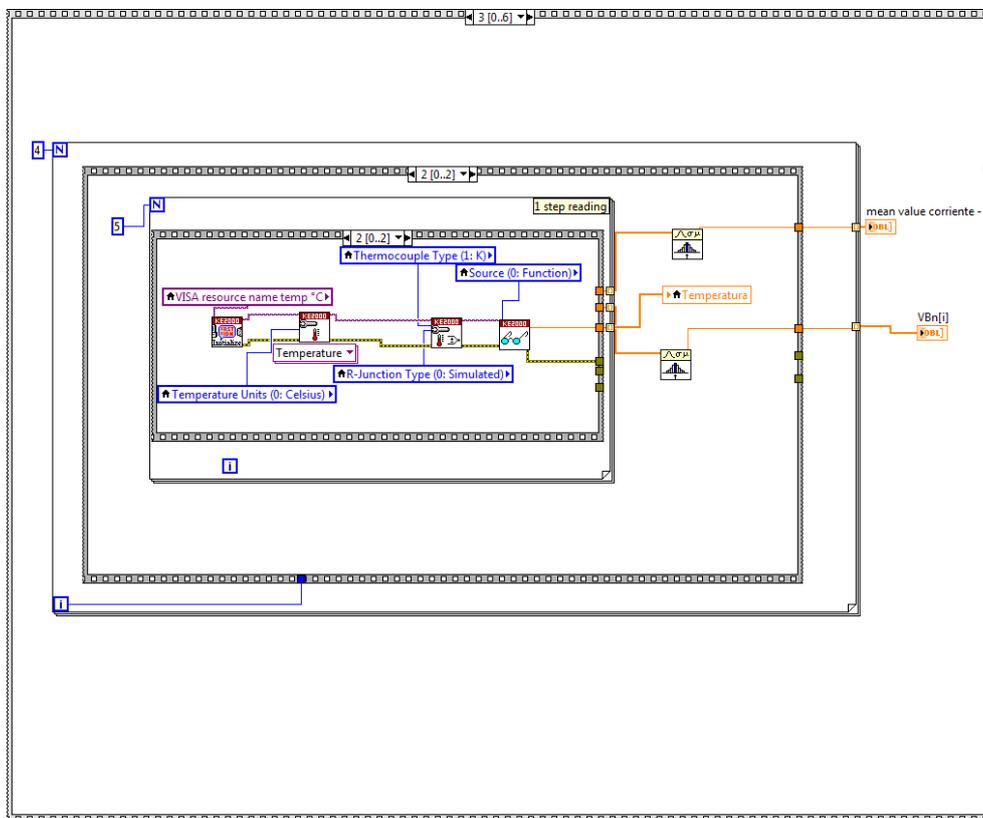
La medición del voltaje y sus promedios para obtener el arreglo (array) VBn[i]

Figura 71 Marco 3, 1er sub marco2, 2º sub marco 1



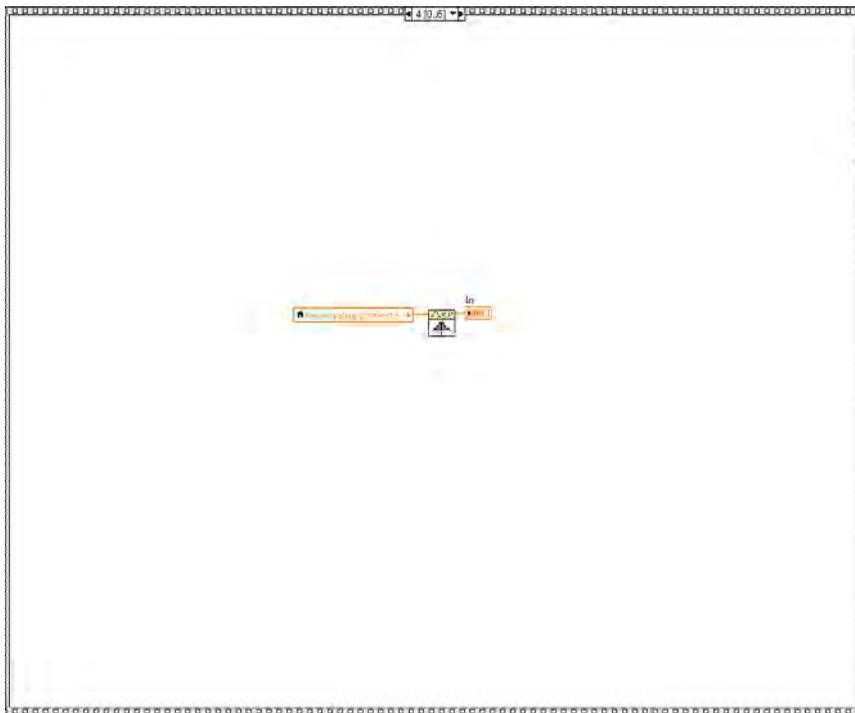
Contiene la medición de la corriente y sus promedios con el campo en B-

Figura 72 Marco 3 1er sub marco2, 2º sub marco 2



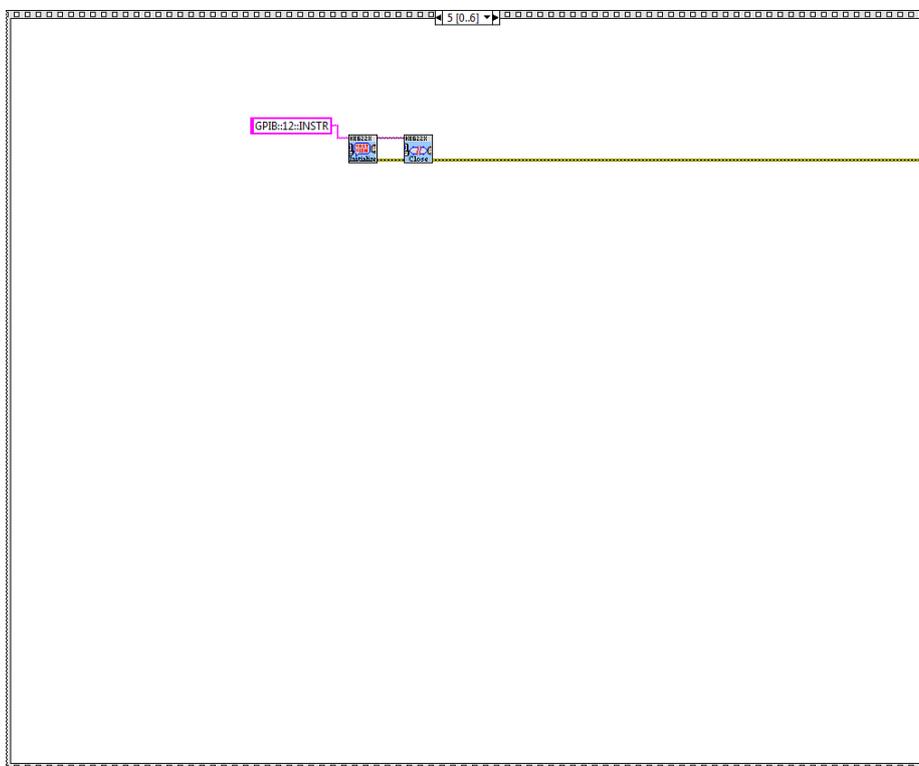
Muestra la medición de temperatura y su promedio-

Figura 73 Marco 4



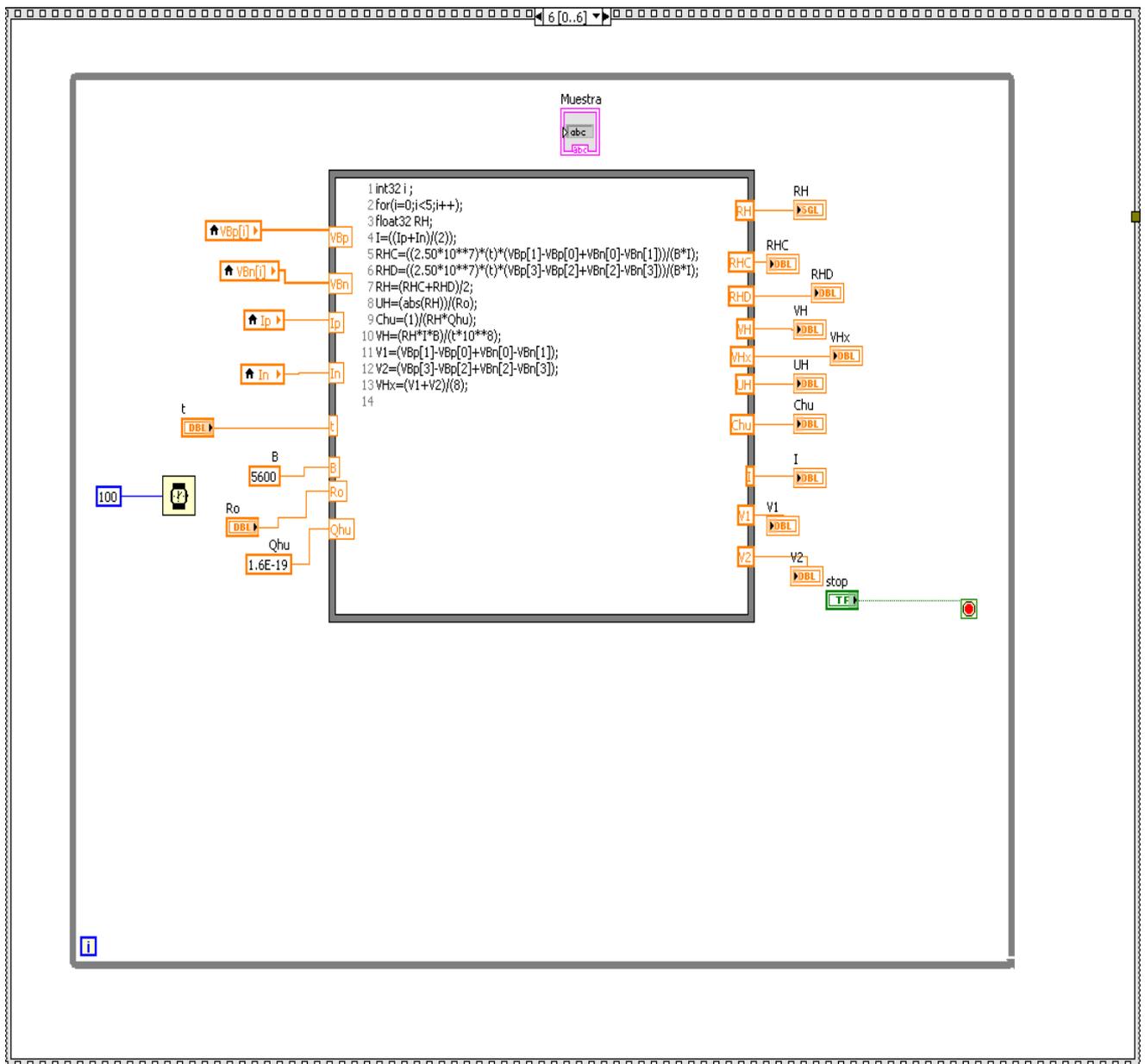
Calcula la corriente media con el campo en B-

Figura 74 Marco 5



Cierre y suspensión de la inyección de corriente-

Figura 75 Marco 6 vista del formula node para el cálculo de Hall



Efectúa los cálculos con datos de entrada del espesor t el campo magnético en gauss la carga del hueco ó electrón y los arreglos (array) obtenido $VBp[i]$, $VBn[i]$ y las corrientes I_p e I_n calculando con las formula de la norma ASTM -76 para para obtener los datos de salida del voltaje de Hall V_H , el coeficiente de Hall R_H la movilidad μ_H y la concentración de portadores C_{HU} (huecos ó electrones)

4.4 PARTE EXPERIMENTAL

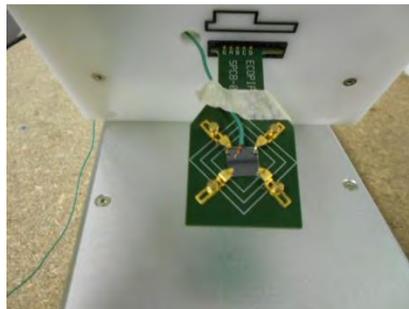
4.4.1 PREPARACION DE LAS MUESTRAS

La preparación de las muestras se llevó a cabo de la siguiente manera, se cortaron las muestras con una herramienta de diamante guiada por una plantilla de la oblea obtenida con un escáner y dibujándole una cuadrícula en corell para obtener un corte lo más cuadrado posible, enseguida se sujetaron a una limpieza con acetona y etanol para posteriormente desoxidarla con ácido fluorhídrico(HF) diluido en etanol al 20% inmediatamente se aplicaron los contactos con pintura de plata en las 4 esquinas y se procedió a darles un tratamiento térmico a 900° Centígrados según las recomendaciones contenidas en la referencia # 6, en el anexo(Manual de operación del sistema de medición) se detallan los procedimientos de preparación de las muestras con imágenes.

4.4.2 MEDICION DE MUESTRAS DE SILICIO CRISTALINO TIPO "P"

Se coloca la muestra con el termopar (el termopar debe quedar cercano pero no pegar en la muestra) en el porta muestras como se ve en la imagen

Figura 76 colocación de la muestra



Luego se coloca en el contenedor del magneto

Figura 77 colocación en el magneto



Se prende la PC y se abre el archivo LabView una después la carpeta OTROS VI MAS IMPORTANTES, con los VI, Gráficos I-V, CALCULO DE RESISTIVIDAD x Y MEDICION DE HALL o también se puede abrir el LabView 2011 se efectúan las medidas para cada muestra, en nuestro caso las muestras que nos entregó Cesar Franco para ser caracterizadas antes del crecimiento se nombraron como STPU-3, STPU-4, y se muestran los resultados de las

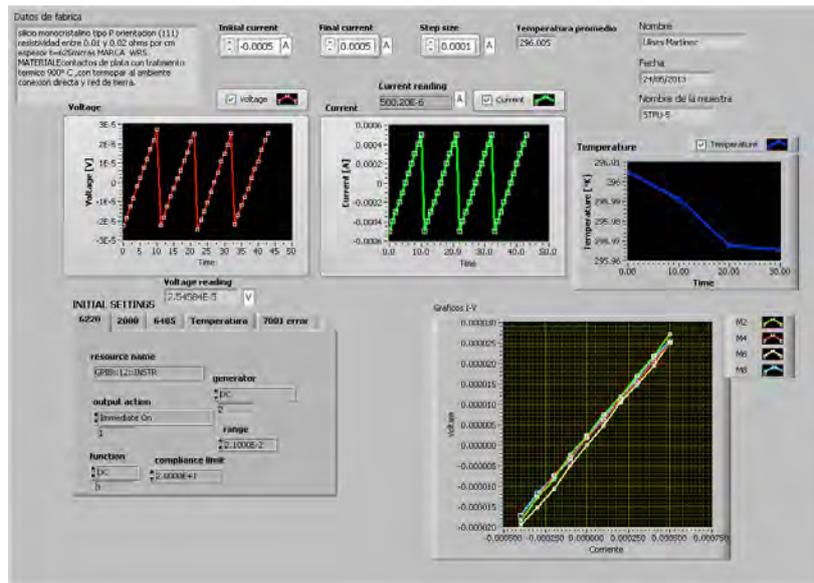
mediciones con el equipo de CFATA a continuación. Además, con el fin de ampliar el rango de mediciones se decidió preparar y probar 2 muestras más de diferente resistividad, STPU-5 y STPU-6

Pruebas a muestras STPU-5 y STPU-6, STPU-3 y STPU-4 en CFATA el 24/05/2013 Y EL 27/05

Prueba STPU-5 (espesor 648 micras)

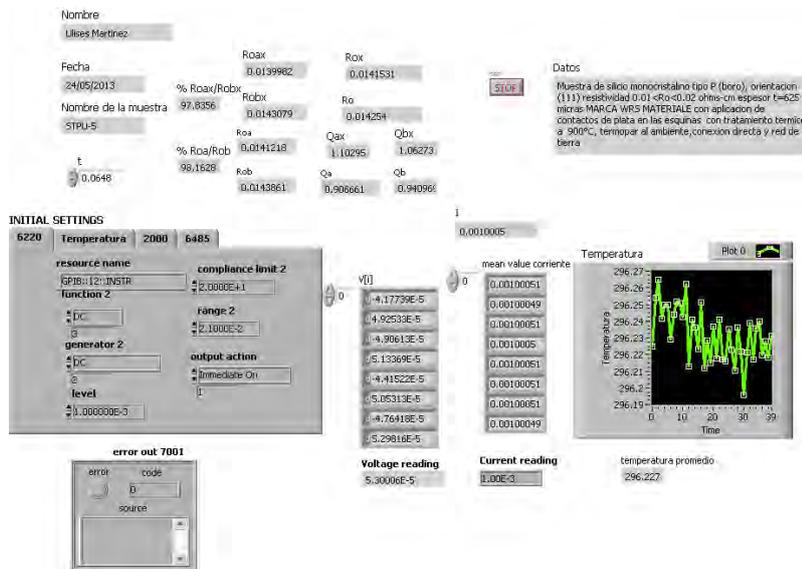
Figuras 78 (a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y (c) Hall STPU-5

(a) Gráfica I-V



Contactos óhmicos para inyección de -0.0005 amp a 0.0005 amp

(b) Resistividad

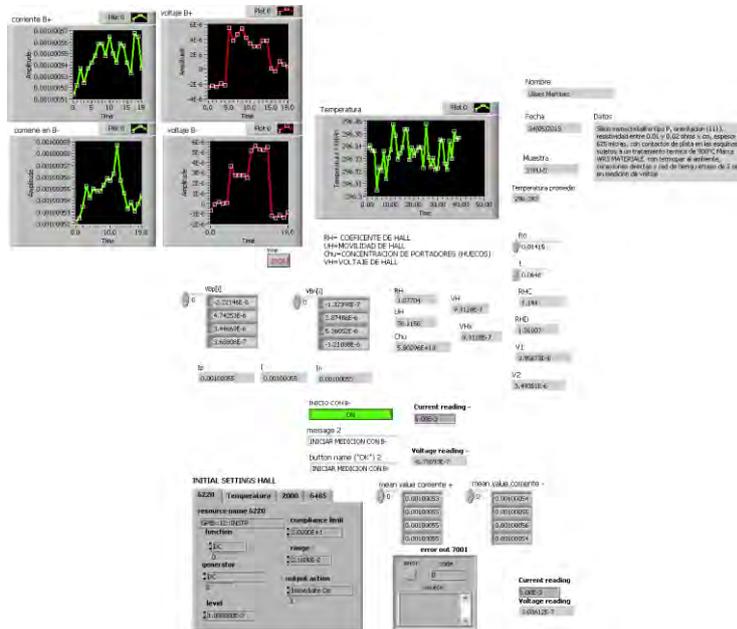


(78)

Resistividad=0.01415 Ω-c

(c) Hall

Hall con 1 ma de inyección

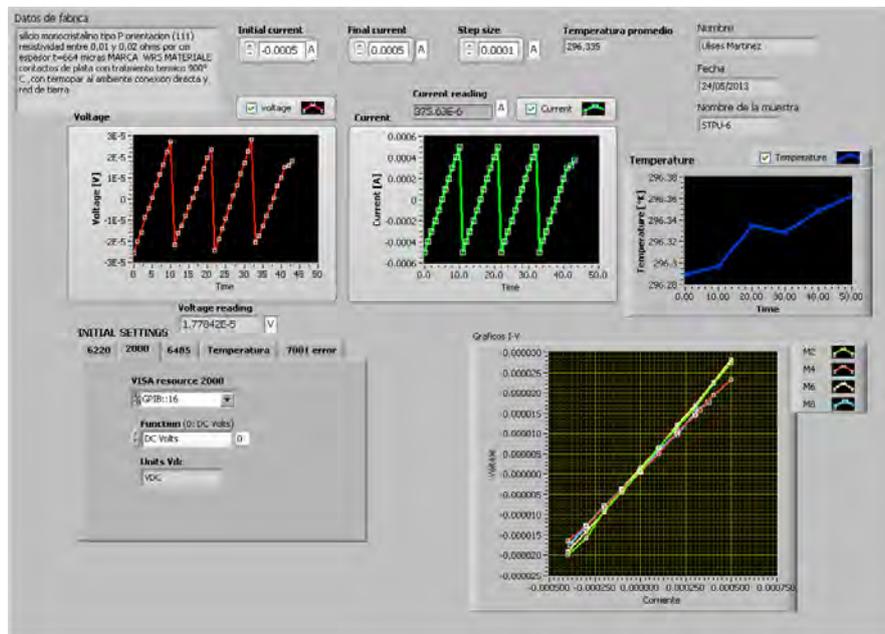


(78)

Pruebas muestra STPU-6

Figuras 79 (a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y (c) Hall STPU-6

(a) Graficas I-V



Contactos óhmicos

(b) Resistividad

Nombre: Ulises Martinez

Fecha: 24/05/2013

Nombre de la muestra: STPU-6

Roax: 0.0147542, Rox: 0.0148044, % Roax/Robx: 99.3246, Robx: 0.0148546, Rg: 0.014600, Roa: 0.0145436, Qax: 0.85229, Qbx: 0.681844, t: 0.0664, Rob: 0.014657, Qa: 1.17331, Qb: 1.16057

Datos: Muestra de silicio monocristalino tipo P (boro), orientacion (111), resistividad 0.014600 Ω-cm, espesor t=664 micras-MARCA WPS MATERIALS con aplicacion de contactos de plata en las esquinas con tratamiento termico a 900°C, templar al ambiente,conexion directa y red de tierra

INITIAL SETTINGS: 6220, Temperatura 2000, 6485

resource name: GPIB:12:INSTR, compliance limit 2: 2.0000E+1, function 2: DC, range 2: 2.1000E-2, generator 2: DC, output action: Immediate On, level: 1.000000E-3

mean value corriente: 0.00100067

Voltage reading: 4.69521E-5, Current reading: 1.00E-3

Temperatura: 296.424

0.014600 Ω-cm

(79) Resistividad

(c) Hall

Nombre: Ulises Martinez

Fecha: 24/05/2013

Muestra: STPU-6

Temperatura promedio: 296.380

Ro: 0.0148, t: 0.0664, RHC: 0.88330, RHD: 1.12389, V1: 2.9221E-5, V2: 3.79221E-5

RH+ COEFICIENTE DE HALL, UH+MOVILIDAD DE HALL, CHU+CONCENTRACION DE PORTADORES (HUECOS), VH+VOLTAJE DE HALL

VH: 3.4484E-6, UH: 6.4034E-6, RH: 0.00489, VH: 4.4023E-7, CHU: 8.88382, VH: 4.4003E-7, V1: 2.9221E-5, V2: 3.79221E-5

ip: 0.000006, i: 0.00100045, 0: 0.00100048

INITIAL SETTINGS HALL: 6220, Temperatura 2000, 6485

resource name: GPIB:12:INSTR, compliance limit: 0.0000E+1, function: DC, range: 2.1000E-2, generator: DC, output action: Immediate On, level: 1.000000E-3

mean value corriente: 0.00100067, mean value corriente: 0.00100067

error out 7001: error code: 0, source: SUPCR

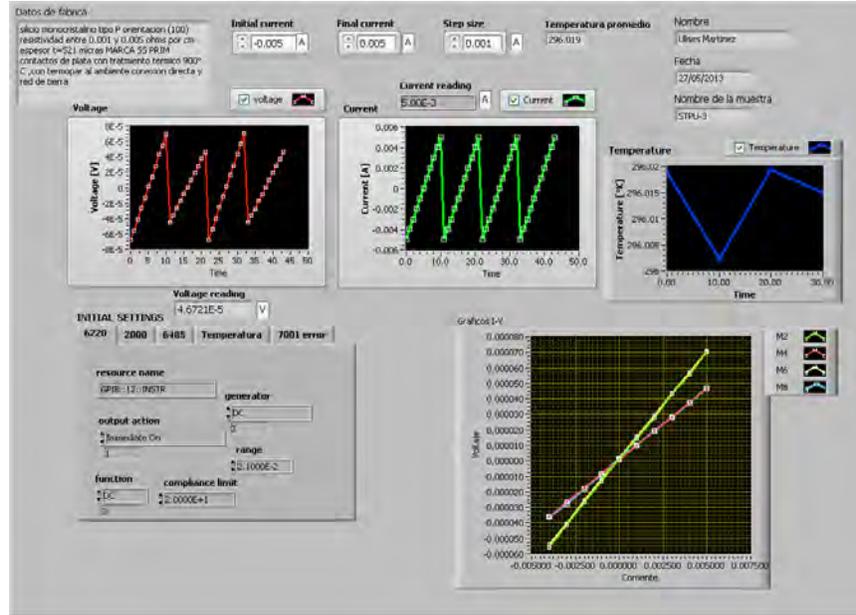
Current reading: 1.00E-3, Voltage reading: 4.7504E-6

(79)

Pruebas STPU-3

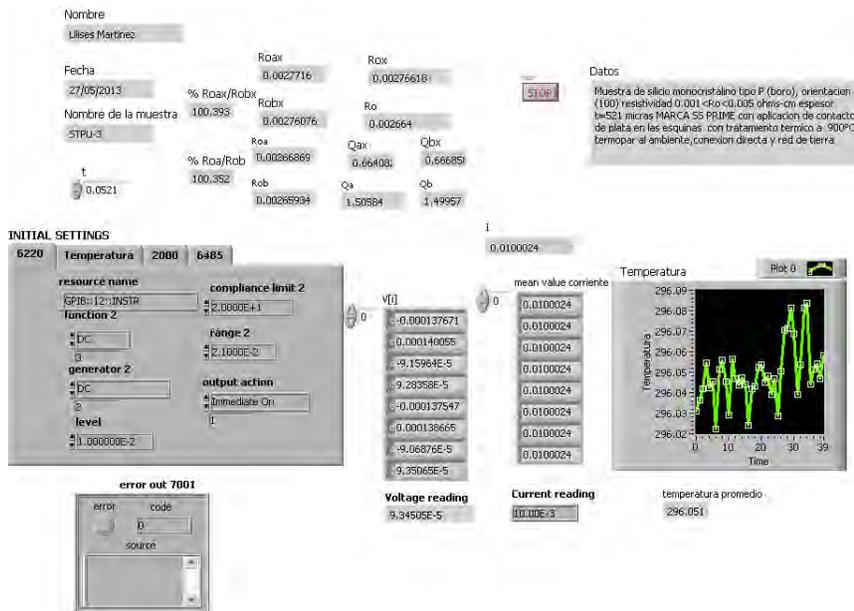
Figuras 80 (a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y(C) Hall STPU-3

(a) Graficas I-V



Contactos óhmicos

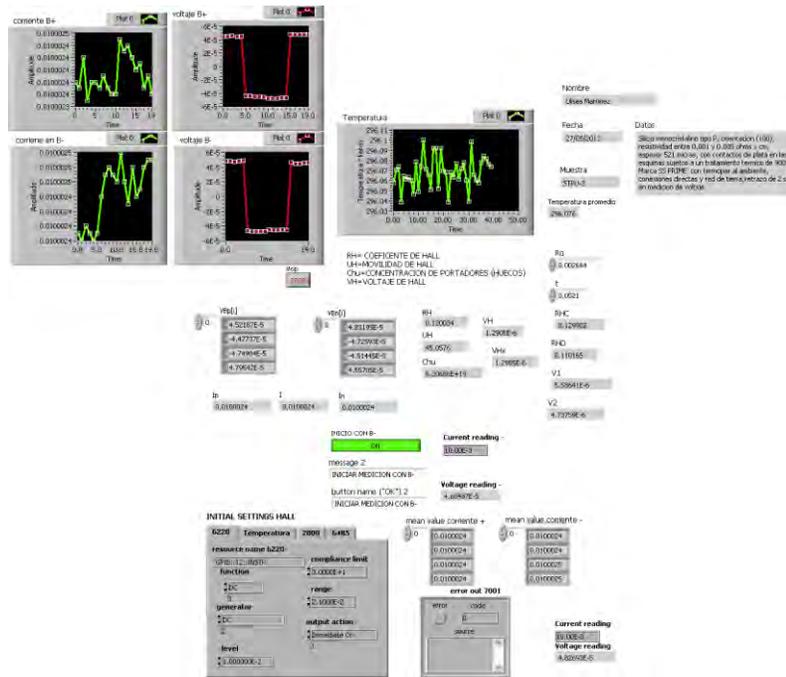
(b) Resistividad



(80)

Resistividad = 0.002664 Ω-cm

(c) Hall

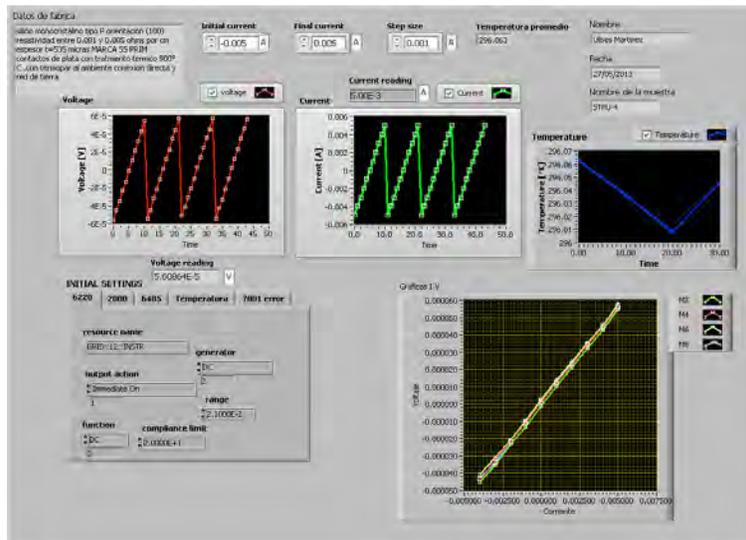


(80)

Pruebas STPU-4

Figuras 81(a) Gráficos I-V, (b) Resistividad Y(c) Hall STPU-4

(a) Graficas I-V



(81) Contactos óhmicos

(b) Resistividad

Nombre
Ulises Martinez

Fecha
27/05/2013

Nombre de la muestra
STPL-4

t
0.0535

Roax
0.00268058

% Roax/Robx
99.9024

Roa
0.0026832

% Roa/Rob
99.8783

Rob
0.0026832

Qax
1.01534

Qbx
1.01808

Qa
0.964891

Qb
0.982236

Datos
Muestra de silicio monocristalino tipo P (boro), orientacion (100) resistividad 0.001 ρ <math>< 0.005</math> ohm-cm espesor ≈ 535 micras MARCA SS PRIME con aplicacion de contactos de plata en las esquinas con tratamiento termico a 900°C, temporar al ambiente, conexion directa y red de tierra

INITIAL SETTINGS
6220 Temperatura 2000 6485

resource name compliance limit 2
EP1B:12:INSTR 2.000E+1

function 2 range 2
2.100E-2

generator 2 output action
DC Immediate On

level
1.000000E-2

V[1]
-0.000108911
-0.000110475
-0.000111055
-0.000111896
-0.000109112
-0.000110217
-0.000110386
-0.000112909

mean value corriente
0.0100025

Temperatura
296.12
296.11
296.1
296.09
296.08
296.07
296.06
296.05

error out 7001
error code
0

Voltage reading
0.000112935

Current reading
0.00E-3

temperatura promedio
296.104

(81) Resistividad = 0.002681 Ω -cm

(c) Hall

Nombre
Ulises Martinez

Fecha
27/05/2013

Muestra
STPL-4

Temperatura promedio
296.104

Datos
Muestra de silicio monocristalino tipo P, orientacion (100), resistividad entre 0.001 y 0.005 ohm-cm, espesor 535 micras, con contactos de plata en las esquinas suaves a 900°C con tratamiento termico de 900°C, MARCA SS PRIME, con temporar al ambiente, conexiones directas y red de tierra tratada de 2 seg en medicion de voltaje

RH= COEFICIENTE DE HALL
UH=MOVILIDAD DE HALL
CH=CONCENTRACION DE PORTADORES (HUECOS)
VH=VOLTAJE DE HALL

R0
0.002681

t
0.0535

RH
0.01768

UH
1.2260E-6

CH
1.2680E-6

VH
0.114971

RH0
0.110041

V1
0.000000

V2
0.000000

V[0]
-4.8589E-6
-4.1779E-6
-5.7094E-6
-4.7745E-6

V[1]
1.4000E-7
7.1004E-7
3.4000E-6
-2.2041E-6

Ib
0.0100025

Ic
0.0100025

Ia
0.0100025

mean value corriente
0.0100025

mean value corriente
0.0100025

error out 7001
error code
0

Current reading
0.00E-3

Voltage reading
2.9600E-2

INITIAL SETTINGS HALL
6220 Temperatura 2000 6485

resource name compliance limit
EP1B:12:INSTR 2.000E+1

function 2 range
2.100E-2

generator 2 output action
DC Immediate On

level
1.000000E-2

mean value corriente
0.0100025

mean value corriente
0.0100025

error out 7001
error code
0

Current reading
0.00E-3

Voltage reading
2.9600E-2

(81)

4.4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Se hizo una comparación contra las lecturas del calculador de Solecon Laboratories cuyos cálculos están basados en (Thurber, Mattis, Liu, and Filliben, National Bureau of Standards Special Publication 400-64, The Relationship Between Resistivity and Dopant Density for Phosphorus-and Boron-Doped Silicon (May 1981), Table 10, Page 34 and Table 14, Page 40.) referencia # [9],

la comparación se muestra en la siguiente tabla

Tabla 5 de resistividad + concentración de portadores

muestra	Ro CFATA	C _{HU} CFATA	Ro SOLECON	C _{HU} SOLECON	C _{HU} C/ C _{HU} S
STPU-3	0.002664	5.2068X10 ¹⁹	0.002664	4,24X10 ¹⁹	1.23
STPU-4	0.002681	5.3345X10 ¹⁹	0.002681	4.21X10 ¹⁹	1.26
STPU-5	0.01415	5.8029X10 ¹⁸	0.01415	4.66X10 ¹⁸	1.24
STPU-6	0.01460	6.2195X10 ¹⁸	0.01460	4.43X10 ¹⁸	1.40

Donde Ro =resistividad y Chu=concentración de huecos y se encontraron valores muy diferentes, analizando estos resultados observamos que precisamente es porque en nuestros cálculos del formula node consideramos el valor de $r=1$, y como dice Schroder (referencia [10]) el valor real de $RH_x = r/q p$ o sea $RH * r$ donde $r \neq 1$ y r (factor de Hall) es un factor que depende del tipo de colisiones, las colisiones pueden ser con la estructura del cristal o con los iones de impurezas que es lo más común y a temperatura ambiente y más altas temperaturas con los fonones, entonces nos conviene usar los valores de Solecon (que son para 300°K) para obtener valores de $Chux = Chu/r$, donde $Chux$ es el valor real de la concentración de portadores con $r \neq 1$ y conocer el valor de r para poder calcular la movilidad de Hall UH_x porque la que habíamos obtenido en realidad era la movilidad de la conductividad UH .

Y lo haremos de la siguiente manera con el calculador de Solecon obtendremos una tabla y una grafica de Ro Vs Chux o sea resistividad contra concentración de portadores en el programa de origen en el cual podremos encontrar la aproximación que más se ajuste a los datos y por lo tanto una ecuación de Chux en función de Ro que ingresaremos a nuestro formula node para conocer el valor de Chux y por consiguiente el de r

Esta es la aproximación lineal obtenida en origen:

Figura 82 Grafica de aproximación exponencial

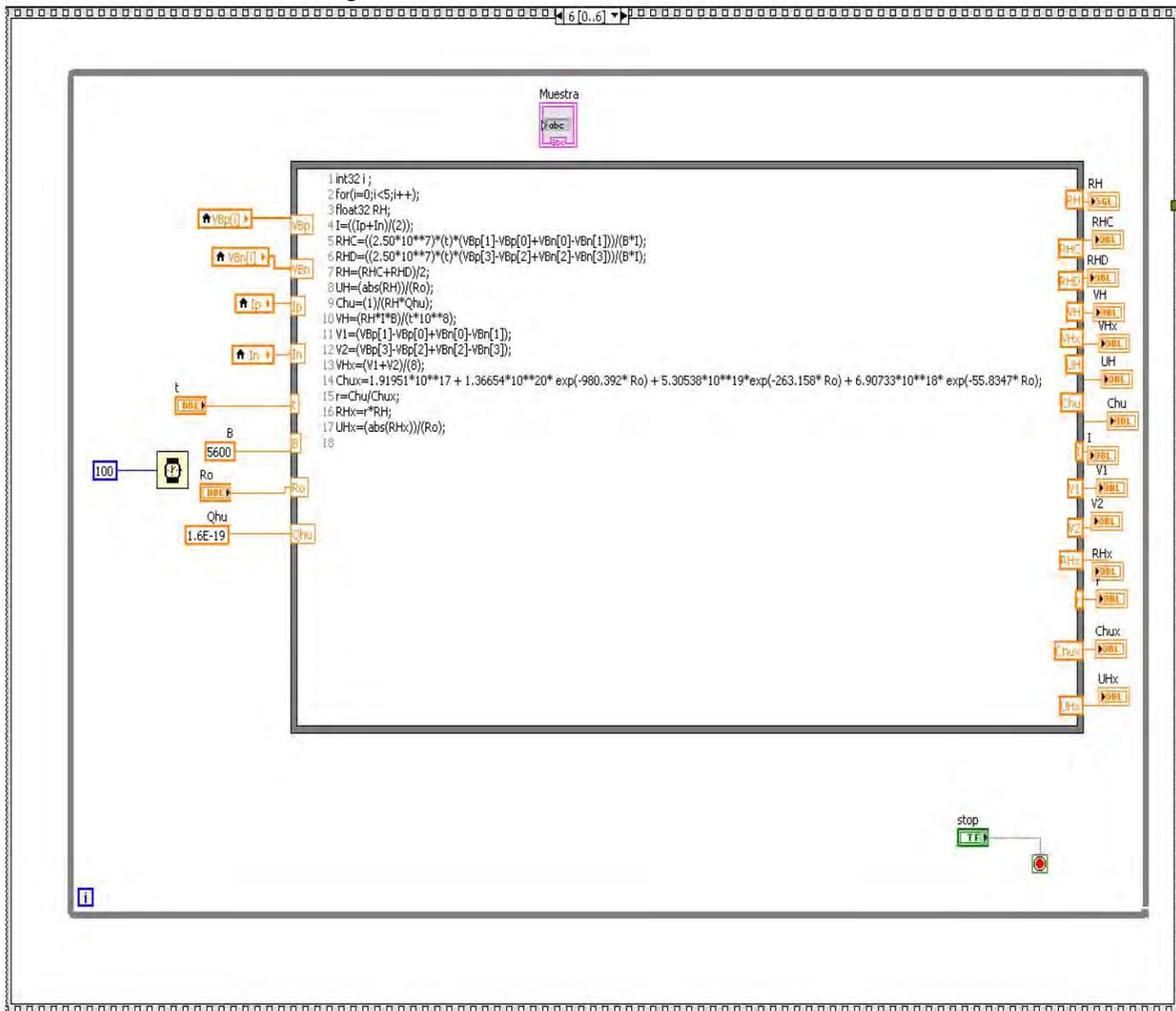
Cuya ecuación es:

$$Chux = 1.91951 \times 10^{17} + 1.36654 \times 10^{20} e^{-980.3921568627451Ro} + 5.305380000000001 \times 10^{19} e^{-263.1578947368421Ro} + 6.90733 \times 10^{18} e^{-55.83472920156338Ro}$$

Ingresando la ecuación en el VI MEDICION DE HALL vi

El nuevo formula node quedaría

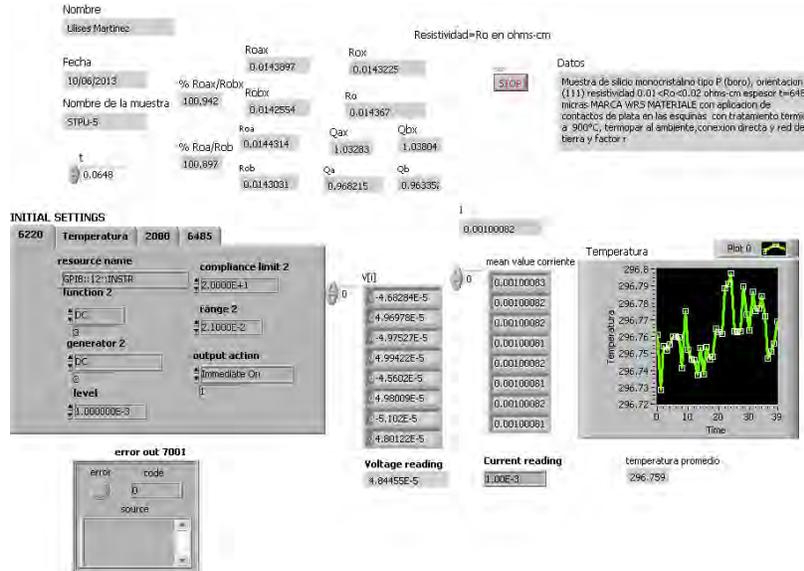
Figura 83 formula node modificado



Pruebas STPU-5. Con $r \neq 1$

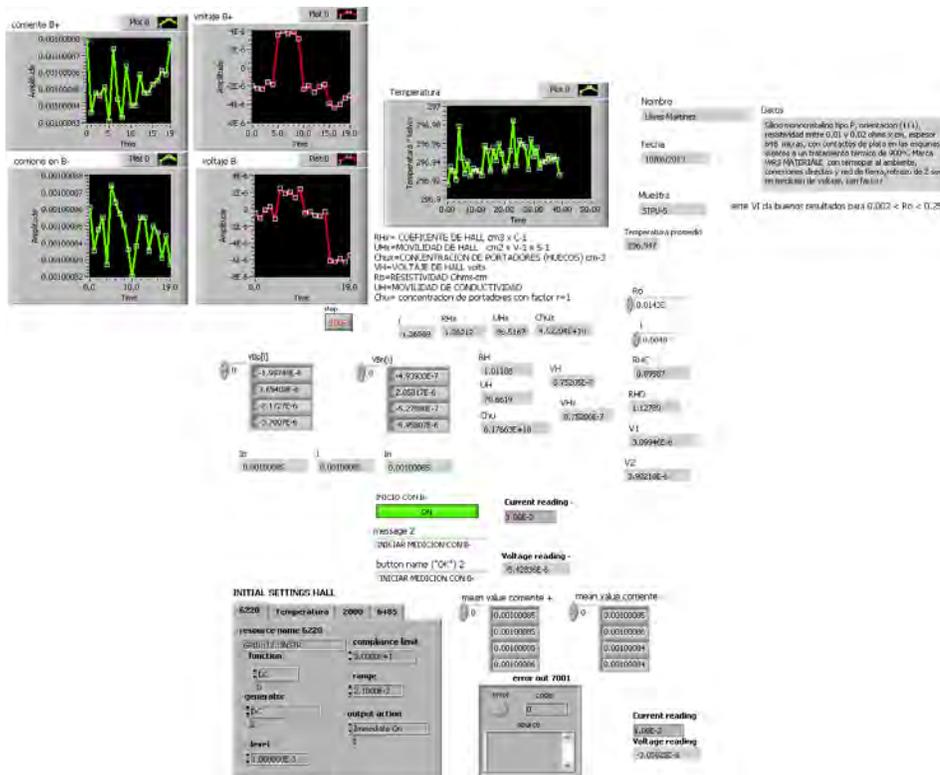
Figuras 86 (a) resistividad y (b) efecto Hall STPU-5

(a) Resistividad



Resistividad=0.01432 Ω -cm

(b) Hall

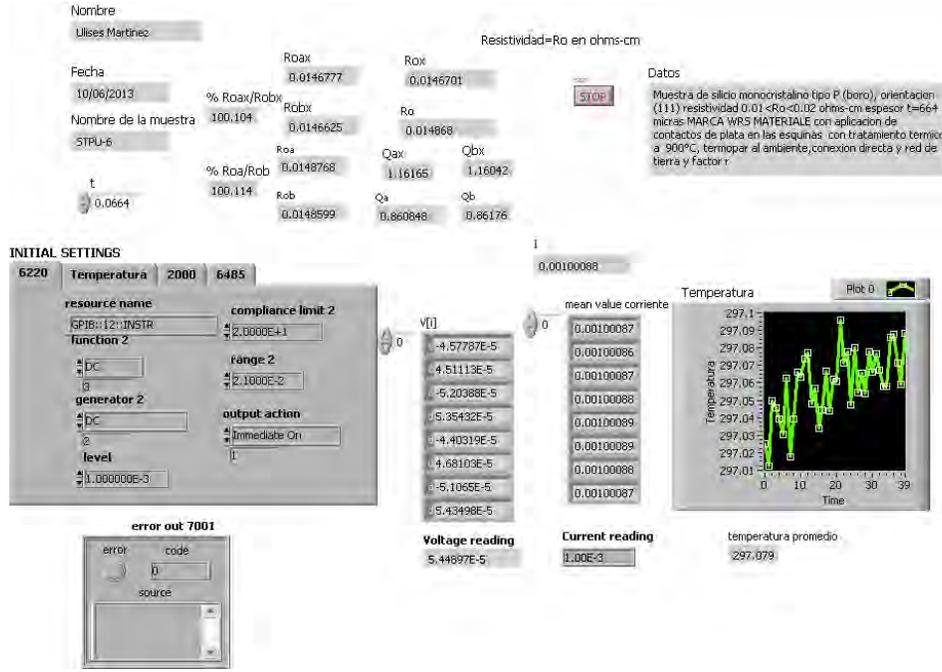


(86)

Pruebas STPU-6. Con r≠1

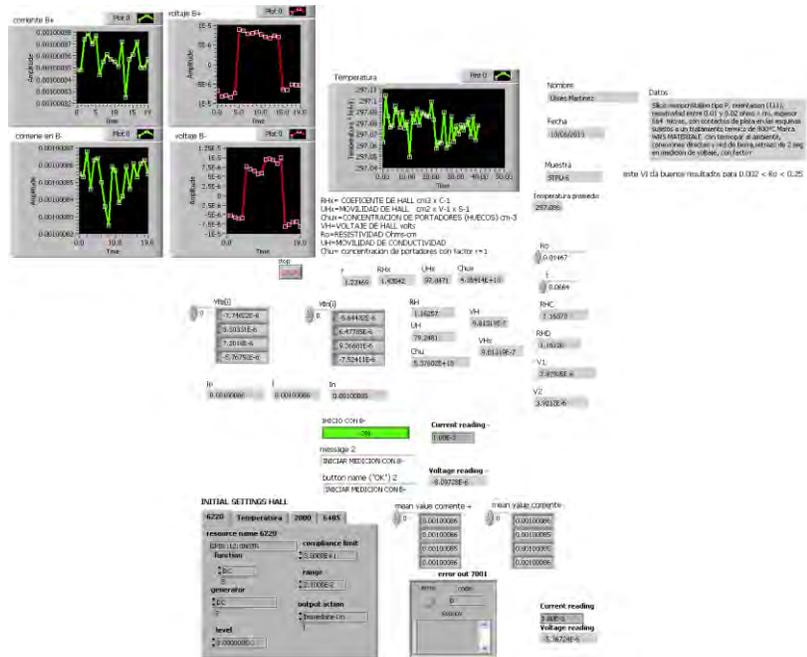
Figuras 87 (a) resistividad y (b) efecto Hall STPU-6

(a) Resistividad



Resistividad=0.01467 Ω-cm

(b) Hall



(87)

Resumen de resultados de mediciones con el factor r y contrastación del sistema

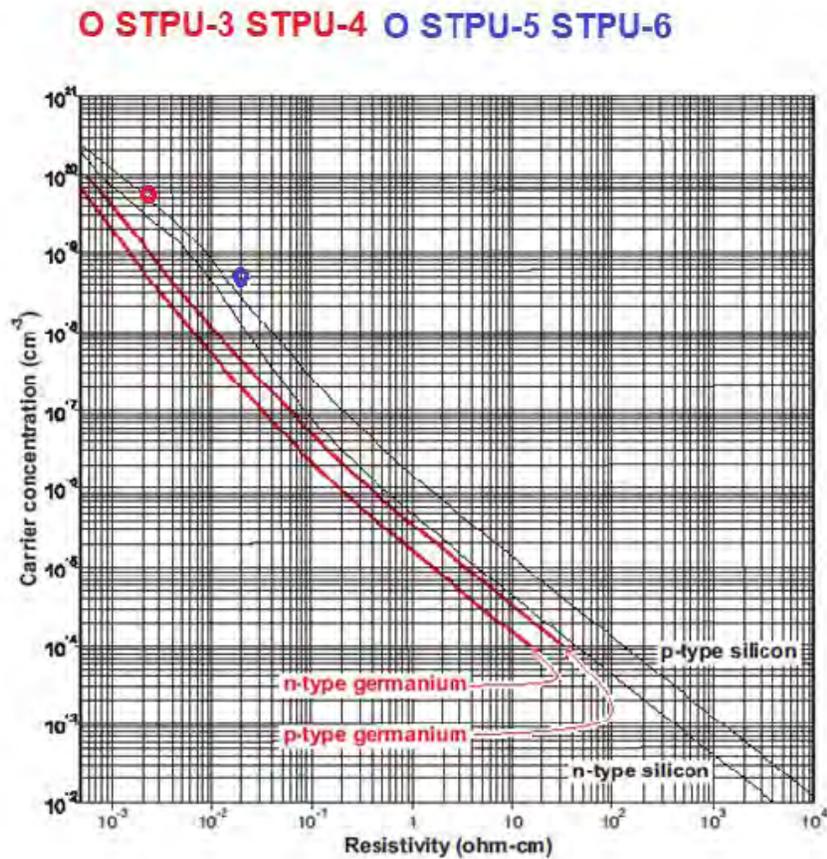
Todas las mediciones se hicieron a temperatura ambiente con un valor medio de 296.92 ° kelvin o 23.92 ° centígrados valor cercano a 300° K por lo que se puede decir que la dispersión es principalmente fononica y observamos que el valor de r es cercano a $3\pi/8$

Tabla 6 de contrastación o comparación

muestra	Resistividad CFATA	Concentración de portadores Chux CFATA	Resistividad Solecon	Chux Solecon	Movilidad UHx CFATA
STPU-3	0.002668	4.2425×10^{19}	0.002668	4.23×10^{19}	55.21
STPU-4	0.002684	4.21541×10^{19}	0.002684	4.20×10^{19}	55.24
STPU-5	0.01432	4.5220×10^{18}	0.01432	4.57×10^{18}	96.51
STPU-6	0.01467	4.3541×10^{18}	0.01467	4.40×10^{18}	97.84

Mostramos el lugar donde se encuentran nuestras medidas en una gráfica de resistividad Vs concentración de portadores de Solecon referencia [9]

Figura 88 grafico de resistividad Vs concentración de portadores (a 300° K) Tomada de la referencia [9]



Se observa que los valores obtenidos con el sistema de medida de CFATA son casi iguales al calculador de Solecon, se hace la aclaración de que el VI MEDICION DE HALL da buenos resultados para el rango de bajas resistividades $0.002 < R_o < 0.2$ si se requiere medir muestras con mayores valores hay que usar el VI MEDICION DE HALL 2, y MEDICIÓN DE HALL 3 según el rango de la resistividad, que se dejaron en la PC para este propósito.

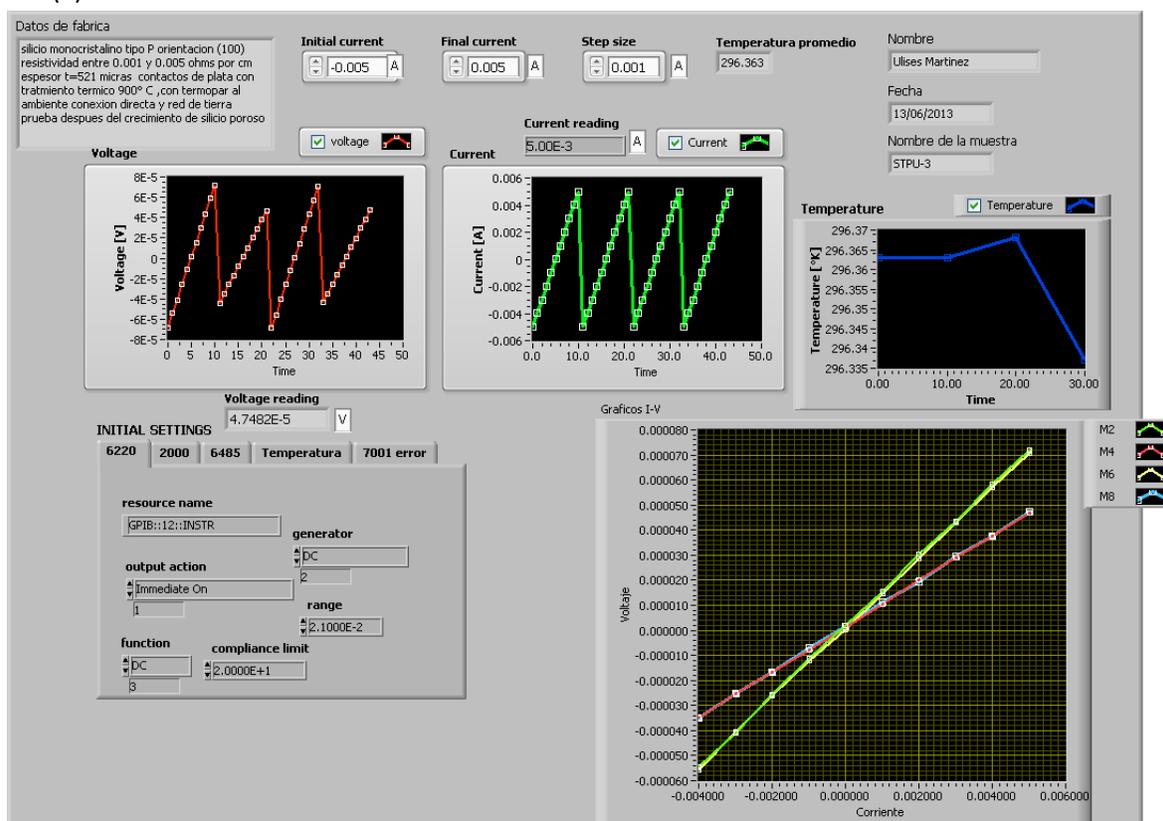
4.4.5 MEDICIÓN DESPUÉS DEL CRECIMIENTO DE SILICIO POROSO

Se seleccionaron las muestras STPU-3 Y STPU-4 para su crecimiento de silicio poroso, a continuación mostramos los resultados de sus pruebas después del crecimiento.

Pruebas STPU-3.

Figuras 89 (a) gráficos I-V, (b) resistividad, (c) efecto Hall STPU-3

(a) Graficas I-V



Contactos óhmicos

(b) Resistividad

Nombre: Ulises Martínez

Fecha: 13/06/2013

Nombre de la muestra: STPLU-3

Resistividad=Ro en ohms-cm

Datos: Muestra de silicio monocristalino tipo P (boro), orientación (100) resistividad 0.001 < Ro < 0.005 ohms-cm espesor (s=52) micras MARCA 55 PRIME con aplicación de contactos de plata en las esquinas con tratamiento térmico a 900°C, tempear al ambiente, conexión directa y red de tierra y Factor r_p prueba después del crecimiento de silicio poroso

Roax: 0.0027399, Row: 0.0027695, Rcbx: 0.00276801, Ro: 0.002662

Qax: 0.65235, Qbx: 0.65251, Qa: 1.53292, Qb: 1.53254

INITIAL SETTINGS: 6220, Temperatura, 2000, 6485, compliance limit 2, range 2, output action Immediate On, level 1

Voltage reading: 9.18283E-5, Current reading: 10.00E-3, temperatura promedio: 296.266

(89)

Resistividad=0.002662 Ω-cm

(c) Hall

comente B- Plot 0, voltaje B- Plot 0, Temperatura Plot 0

Nombre: Ulises Martínez, Fecha: 10/06/2013, Muestra: STPLU-3, Datos: silicio monocristalino tipo P, orientación (100), medido al aire entre 0.001 y 0.005 ohms-cm, espesor 52.1 micras, con contactos de plata en las esquinas tempeados al ambiente térmico a 900°C MARCA 55 PRIME con tempear al ambiente, conexiones directas y red de tierra porosa de 2 seg en medidor de voltaje, con factor r_p (prueba después del crecimiento de silicio poroso)

Resistividad promedio: 0.002662

Ro: 0.002662, r: 0.6521

Roax: 0.0027399, Row: 0.0027695, Rcbx: 0.00276801, Ro: 0.002662

Qax: 0.65235, Qbx: 0.65251, Qa: 1.53292, Qb: 1.53254

INITIAL SETTINGS HALL: 6220, Temperatura, 2000, 6485, compliance limit 2, range 2, output action Immediate On, level 1

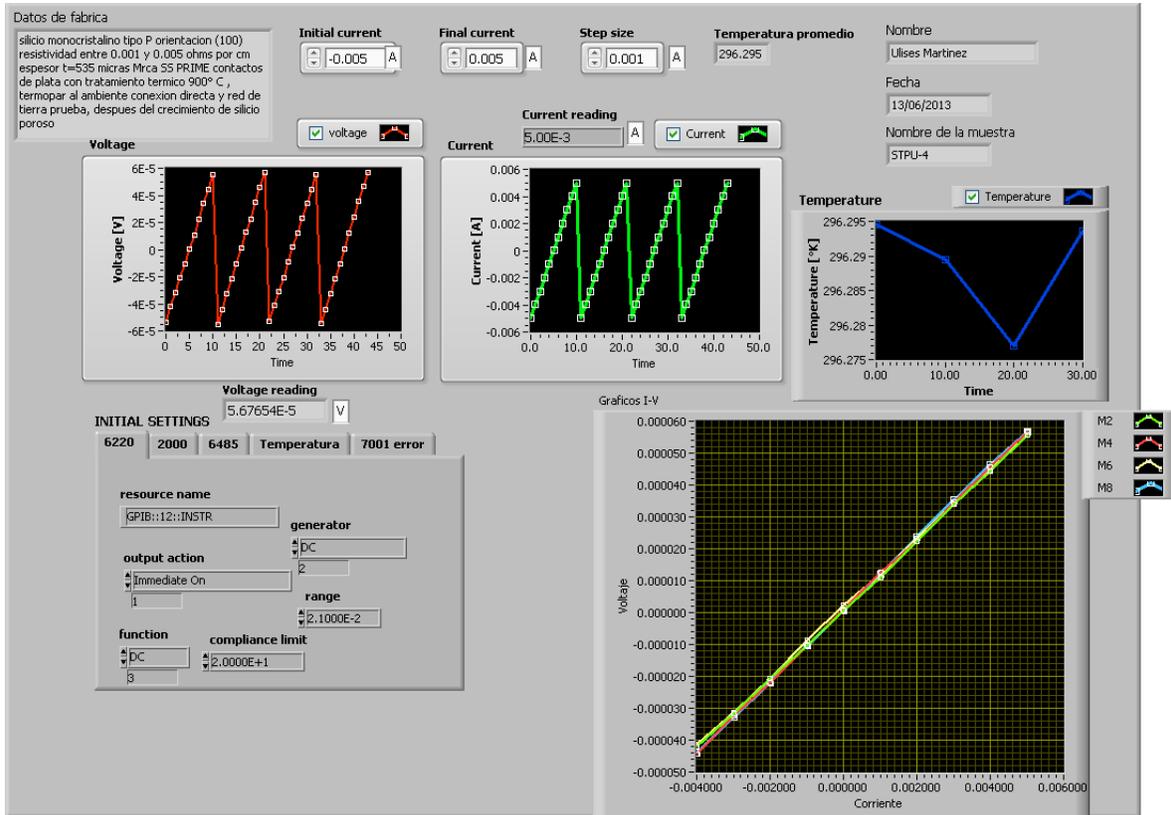
Current reading: 10.00E-3, Voltage reading: 9.18283E-5

(89)

Pruebas STPU-4.

Figuras 90 (a) gráficos I-V, (b) resistividad, (c) efecto Hall STPU-4

(a) Gráficos I-V



Contactos óhmicos

(b) Resistividad

Nombre: Ulises Martinec

Resistividad=Ro en ohms-cm

Roax	0.00269405	Ro	0.00268257
Fecha	13/06/2013	% Roax/Robx	100.11
Nombre de la muestra	STPU-4	Robx	0.0026811
t	0.0535	Ro	0.00269101
		% Roa/Rob	100.118
		Qax	1.02935
		Qbx	1.02896
		Qa	0.971487
		Qb	0.97233

Datos: Muestra de silicio monocristalino tipo P (boro), orientacion (100) resistividad 0.001 < Ro < 0.005 ohms-cm espesor t=535 micras MARCA SS PRIME con aplicacion de contactos de plata en las esquinas con tratamiento termico a 900°C, templar al ambiente, conexion directa y red de tierra y Factor r, prueba despues del crecimiento de silicio poroso

INITIAL SETTINGS: 6220 Temperatura 2000 6485

error out 7001

Voltage reading: 0.000113696

Current reading: 0.0100023

Temperatura promedio: 296.272

Resistividad=0.002682 Ω-cm

(90)

(c) Hall

Nombre: Ulises Martinec

Fecha: 13/06/2013

Muestra: STPU-4

Datos: esta VI da buenos resultados para 0.002 < Ro < 0.25

Temperatura promedio: 296.292

INITIAL SETTINGS HALL: 6220 Temperatura 2000 6485

Current reading: 0.0100023

Voltage reading: 0.0002682

error out 7001

(90)

Cuadro de comparación de resultados de pruebas antes y después del crecimiento de Silicio poroso.

Tabla 7 comparación de resultados antes y después del crecimiento

Muestra	Espesor micras	Resistividad Ω -cm		Movilidad de Hall $\text{Cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$		Concentración de portadores (huecos) cm^{-3}	
		Antes	después	antes	después	antes	después
STPU-3	521	0.002668	0.002662	55.21	55.20	4.2425×10^{19}	4.2527×10^{19}
STPU-4	535	0.002684	0.002682	55.24	55.23	4.2154×10^{19}	4.2187×10^{19}

De la tabla se observa que hay un pequeño cambio en la resistividad, mejora la conductividad, las movilidades de Hall permanecen casi iguales, y la concentración de portadores aumenta un poco, es importante hacer notar que de estas pruebas y comparaciones no se puede inferir ningún comportamiento de las propiedades eléctricas derivados de la causal del crecimiento del silicio poroso, primero por el tamaño del muestreo y después por las diferencias tan pequeñas.

5 CONCLUSIONES

Se diseñó e implemento el sistema en base a los instrumentos de medición con los que contaba el laboratorio de radiometría en CFATA y presenta limitaciones hacia las mediciones de baja resistividad principalmente por la sensibilidad y precisión del voltímetro Keithley 2000.

Se puede medir cualquier material siempre y cuando se pongan los contactos adecuados y que resulten óhmicos, los VIs de gráficos I-V y de cálculo de resistividad sirven para todo tipo de materiales, los VIs de efecto Hall dan resultados exactos para silicio tipo P o tipo N para $r \neq 1$ cuando las muestras son medidas a temperatura ambiente, en otros materiales para medidas a temperatura ambiente dispersión fonónica multiplicar los resultados de $r=1$ (U_H y C_{HU}) por $3\pi/8$, u obtener U_{HX} o C_{HX} o r por otros medios, podemos concluir que por los resultados de la contrastación o comparación del sistema de medición con los calculadores de Solecon el sistema de medición de CFATA es bastante preciso y va a proporcionar un elemento más muy importante para la caracterización eléctrica de los materiales.

Pero es importante aclarar que la comparación o contrastación no es una calibración porque la comparación no se hizo contra un instrumento patrón y por lo tanto no se puede determinar la incertidumbre del sistema, se recomienda efectuar una calibración de los instrumentos y el sistema en el CENAM.

Respecto a las pruebas realizadas antes y después del crecimiento de silicio poroso sirven únicamente para comprobar y confirmar que el sistema puede medir los parámetros eléctricos de antes y después del crecimiento este fue el objetivo de este trabajo y como ya se mencionó de las pruebas realizadas antes y después del tratamiento para el crecimiento de silicio poroso, no se puede inferir comportamiento alguno de los parámetros eléctricos derivados de la causa del crecimiento, primero por el tamaño del muestreo y segundo por las diferencias tan pequeñas de los resultados, además de que los contactos no se encontraban dentro de la zona del crecimiento sino en las esquinas de la muestra.

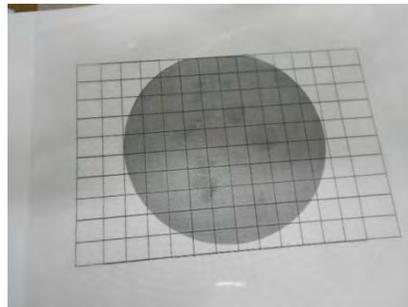
También, es conveniente comentar que en el desarrollo de este proyecto se tuvieron retos importantes, como la adaptación del sistema con instrumentos no modernos (como el multímetro Keithley 2000, y la fuente 6220 en la actualidad se usa el nanovoltmetro 2182 A en combinación con la fuente 6221) obtención de contactos óhmicos con un sistema nuevo y diferente a lo recomendado, la construcción y diseño de la tarjeta conector de salida para la 7012-C y también el diseño de VIs de LabView sin antecedentes para la consulta así como las aproximaciones lineales obtenidas para el cálculo de parámetros de la geometría y el factor r

Perspectivas en un futuro se puede aumentar el rango de medidas de resistividad para valores inferiores si se adquiere un nanovoltmetro 2182 A y una fuente 6221. También, se puede extender el rango hacia valores de alta resistencia (materiales aislantes) comprando cable triaxial y amplificadores unitarios para conectar las guardas sin embargo el rango actual es suficiente para las mediciones comunes en crecimiento de silicio poroso.

6 ANEXOS MANUAL DE OPERACION DEL SISTEMA

Manual de operación

- Preparación de las muestras, las muestras se deben cortar siguiendo la orientación del cristal dato proporcionado por el fabricante, con el objeto de que las muestras sean cuadradas se recomienda obtener una plantilla con el escáner de la muestra impresa sobre un acetato con una cuadrícula de 1x1cm hecha en corell y cortando con un diamante, se muestra un ejemplo de plantilla para una oblea con orientación 100.
- Figura 91 plantilla de corte



- Después de cortadas las muestras se deben limpiar con acetona y etanol y desoxidar con ácido fluorhídrico Hf al 20% en etanol, inmediatamente se deben vaporizar con aluminio en las 4 esquinas como se muestra en las imágenes siguientes

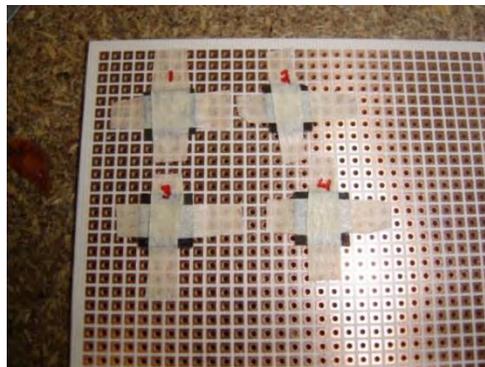


Figura 92 Muestras preparadas para la evaporación

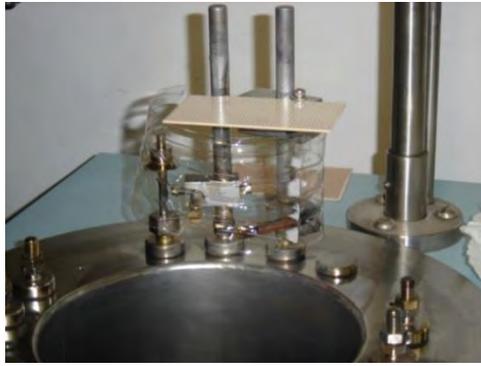


Figura 93(a) Vista de las muestras en la evaporadora (hacia abajo)



Figura93 (b) La campana con su protección haciendo vacío



Figura 93(c) Vaporizando

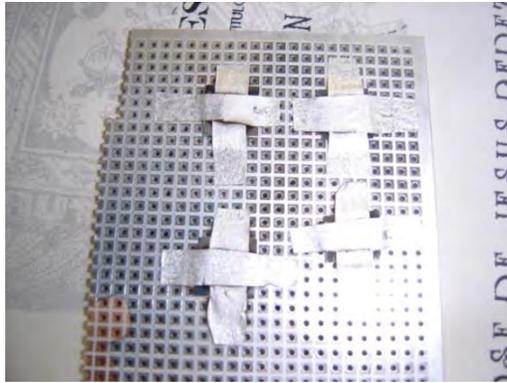


Figura 94 Las muestras vaporizadas este procedimiento fue tomado de la referencia [6]

- Después se aplica plata encima de la aluminio y se da un tratamiento térmico a la muestra a 900°C
 - Figura 95 aplicación de los contactos de plata



- También existe otro procedimiento para la obtención de contactos óhmicos basado en la referencia [6] y es que después de la limpieza se apliquen los contactos en las esquinas con pintura de plata y se dé un tratamiento térmico a la muestra de 900°C en horno tubular como se ilustra en las siguiente imágenes:



Figura 96 Vista del horno tubular



Figura 97 Las muestras



Figura 98 Cargando las muestras en el horno

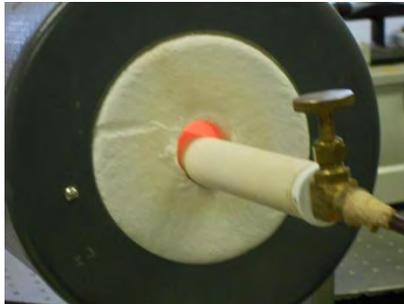


Figura 99 Calentando y circulando gas de argón para evitar la oxidación de la plata Este procedimiento funciono muy bien para las muestras que caracterizamos tal vez porque son de alta conductividad.

- Se mide el espesor de la muestra con un micrómetro de caratula como se ve en la



imagen

- Figura 100 mediciones del espesor

- Procedimiento de prueba, se coloca la muestra y el termopar sobre el porta muestras y se conectan los contactos con los pines del porta muestras teniendo mucho cuidado de que las puntas de prueba queden bien ubicadas sobre los contactos de plata
- Se coloca el porta muestras en el contenedor del magneto



Figura 101 colocación

- Se prenden los instrumentos y la PC se da un tiempo de 10 minutos para el calentamiento de los instrumentos
- Se abre el archivo LabView una
- Se abre la carpeta OTROS VI MAS IMPORTANTES
- o el LabView 2011
- Se selecciona el VI llamado Gráficos I-V y se abre y se anotan en el panel frontal los valores de corriente de inyección, se recomienda para muestras de bajas resistividades, una escalera de $\pm 5\text{ma}$ con escalones de 1ma , se anotan los datos del fabricante el nombre de la muestra el nombre del operador y la fecha (estos datos se repiten en los siguientes VIs)
- Se opera el run del VI y cuando termine se da el comando seleccionar todo el panel frontal, se copia y se pega en Word para el reporte o se imprime
- Si las gráficas I-V son lineales se cierra el VI
- Enseguida se abre el VI llamado CALCULO DE RESISTIVIDAD x, se anota en el panel frontal el valor del espesor en cm se ajusta en el contenedor de INITIAL SETTINGS el valor de la corriente de inyección cuidando de que no exceda el valor recomendado de $I < (200R)^{0.5}$ para muestras de baja resistividad se recomienda 10 ma de inyección para que haya buenas lecturas en el 2000.
- Se opera el run
- Se anota el valor R_o o R_{ox} según sea el valor de Q y se copia y se pega el panel frontal al reporte en Word
- Se abre el VI llamado MEDICION DE HALL(ó EL VI MEDICION DE HALL 2 O 3 según sea el valor de resistividad proporcionado por el fabricante o el resultado de la prueba anterior)

-
- Se ingresan los valores de la resistividad R_o o R_{ox} obtenidas en la prueba anterior así como el valor medido del espesor se ajustan los instrumentos en el panel frontal para la inyección de corriente deseada y las unidades de la temperatura y también se anota el valor de la densidad de flujo B que en nuestro sistema es un imán permanente de 0.56 Tesla y se pone el campo $B+$ dirección norte a sur, se opera el run cuando el VI indique que se debe cambiar la dirección del campo se cambia a $B-$ dirección sur a norte, se anotan los valores de los parámetros voltaje de Hall coeficiente de hall, movilidad de Hall y concentración de portadores se copia y se pega el panel frontal al reporte en Word.

7. REFERENCIAS

- [1] Norma ASTM F 76-86 (Reapproved 1996).
- [2] Keithley's Guide to understanding Electrical Test and Measurement 2012
- [3] Hall Effect, Olof Lindberg 2012.
- [4] AUTOMATIZACIÓN EN EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN LABVIEW DE UN SISTEMA FLEXIBLE DE INSTRUMENTACIÓN APLICADO A LAS MEDIDAS ELÉCTRICAS JACOBO OJEDA GARCÍA 2011.
- [5] Keithley Low Level DC Measuring Instruments 2013
- [6] SELF-DOPING CONTACTS TO SILICON USING SILVER COATED WITH A DOPANT SOURCE D. L. Meier, H. P. Davis, 2000
- [7] MEDIDAS DE RESISTIVIDAD Y EFECTO HALL, Domingo Martínez, 2010
- [8] byuCleanRoom BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY 2013 (PAGINA DE INTERNET)
- [9], Solecon Laboratories Thurber, Mattis, Liu, and Filliben ,National Bureau of Standards Special Publication 400-64, The Relationship Between Resistivity and Dopant Density for Phosphorus- and Boron-Doped Silicon Table 10, Page 34 and Table 14, Page 40.) (May 1981)
- [10] Semiconductor Material and Device Characterization Dieter K. Schroder Wiley, 2006
- [11] LabView entorno grafico de programacion Jose Rafael Lajara Vizcaino, Jose Pelegri Sebastián Alfa Omega 2011
- [12] Faruk Fonthal Rico UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILIFABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN SILICIO POROSO SOBRE c-SI. APLICACIONES ELÉCTRICAS, ÓPTICAS Y TÉRMICAS. 2007

