



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

**“DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES EN ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS POR TERMoeLECTRICIDAD DE NO
CONTACTO, PARA LA GENERACIÓN DE IMÁGENES BAJO
AMBIENTE DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL”**

TESIS

Que para obtener el título de:

MAESTRO EN METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

P r e s e n t a:

Ing. ROBERTO CUAUHTÉMOC RODRÍGUEZ OLVERA

A s e s o r e s:

Dr. GERARDO BARRERA CARDIEL

Dr. HÉCTOR GUILLERMO CARREÓN GARCIDEÑAS

MORELIA, MICH., Febrero de 2009

INDICE

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tablas	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCION	vii
JUSTIFICACION	viii
OBJETIVOS	ix
OBJETIVO GENERAL.....	ix
OBJETIVOS PARTICULARES	ix
HIPOTESIS	x
CAPITULO 1 REVISION BIBLIOGRAFICA:	1
1.1.-Termoelectricidad	1
1.2.-Efecto Seebeck.....	3
1.3.-Técnica Convencional de Termoelectricidad	6
1.4.-Técnica Termoeléctrica de No Contacto.....	8
1.4.1. Definición de términos del fenómeno de termoelectricidad.....	10
1.5.-Sensores Magnéticos	21
1.6.-Control de Movimiento de Motores a Pasos	26
1.7.-Sistemas Analógicos.....	29
1.8.-Comunicación Serial RS-232	33
1.8.1.-Aspectos prácticos de una comunicación serial	37
CAPITULO 2: METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
2.1 Probeta de Cobre con Inclusiones de Estaño.....	42
2.2 Unidades de Control de Temperatura	43
2.3 Soporte para Probeta	44

2.4 Perfil para Sujetar la Probeta	45
2.5 Filtro para Señales del Magnetómetro	46
2.6 Construcción del Manipulador de dos Grados de Libertad	47
2.7 Programación del Control del Manipulador en Lenguaje G.....	48
CAPITULO 3: ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
CAPITULO 4: CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO	69
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....	70
ANEXOS	75

Lista de Figuras

FIGURA 1.1.- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE NO CONTACTO DE LAS IMPERFECCIONES DEL MATERIAL POR MEDIO DEL MONITOREO MAGNÉTICO DE LAS CORRIENTES TERMOELÉCTRICAS.....	VII
FIGURA 1.2.- EFECTO SEEBECK. GRADIENTE DE TEMPERATURA EN UN CONDUCTOR.	4
FIGURA 1.3.- DIFUSIÓN DE UN ELECTRÓN.....	5
FIGURA 1.4.- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA MEDICIÓN TERMOELÉCTRICA.....	7
FIGURA 1.5.- ESQUEMA DE LA TÉCNICA DE TERMOELECTRICIDAD DE NO CONTACTO.....	9
FIGURA 1.6.- EL PICO DEL CAMPO MAGNÉTICO NORMALIZADO Y LA MITAD DE ANCHO ENTRE PICOS COMO FUNCIÓN DE LA DISTANCIA NORMALIZADA ENTRE EL SENSOR-MUESTRA. LAS LÍNEAS CONTINUAS SON PREDICCIONES NUMÉRICAS Y LAS LÍNEAS PUNTEADAS SON ASÍNTOTAS DEL CAMPO LEJANO.	13
FIGURA 1.7.-DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL POTENCIAL TERMOELÉCTRICO (PUNTA CALIENTE).....	14
FIGURA 1.8.-MICROGRAFIA DE ACERO FERRITICO (IZQUIERDA). MAPA DEL POTENCIAL TERMOELÉCTRICO CORRESPONDIENTE A LA ZONA (4MMX5MM).....	15
FIGURA 1.9.- ESQUEMA DE MEDICIÓN DEL PTE (POTENCIAL TERMOELÉCTRICO).	16
FIGURA 1.10.- MUESTRA DE UN COMPOSITO DE UN MATERIAL DE DOS DIFERENTES FASES.	17
FIGURA 1.11.-DISCRETIZACION DEL COMPOSITO MUESTRA.	18
FIGURA 1.12.- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA DE TERMOELECTRICIDAD DE NO CONTACTO.	19
FIGURA 1.13.-IMÁGENES DE INCLUSIONES DE TITANIO CON DIFERENTE CONTENIDO DE NITRÓGENO ($\nabla T \approx 12^\circ\text{C}/\text{CM}$, 2MM DE DISTANCIA ENTRE LA PIEZA Y EL SENSOR, 76.2MM X 76.2 MM DE DIMENSIÓN DE ESCANEÓ).....	20
FIGURA 1.14.- ESPECTRO TÍPICO DE RUIDO PARA DIFERENTES SENSORES MAGNÉTICOS.	23
FIGURA 1.15. UNIONES JOSEPHSON CONECTADAS EN PARALELO. I ES LA CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN, Φ ES EL FLUJO MAGNÉTICO EXTERNO, $\Delta 1$ Y $\Delta 2$ SON LAS DIFERENCIAS DE FASE DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LAS UNIONES.....	25
FIGURA 1.16.-ENERGIZADO DE LA BOBINA A HACIA A'.....	27
FIGURA 1.17.-ENERGIZADO DE LA BOBINA B HACIA B'.....	27
FIGURA 1.18.-ENERGIZADO DE LA BOBINA A' HACIA A.....	28
FIGURA 1.19.-ENERGIZADO DE LA BOBINA B' HACIA B.....	28
FIGURA 1.20.-SISTEMA DE ADQUISICIÓN ANALÓGICO.....	30
FIGURA 1.21.- CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN MULTICANAL ANÁLOGO A DIGITAL.....	33
FIGURA 1.22.- ESTRUCTURA DE UN CARÁCTER QUE SE TRANSMITE POR PUERTO SERIE.....	34
FIGURA 1.23.- NIVELES DE VOLTAJE RS-232.....	36
FIGURA 1.24.-SEÑAL PRESENTE SOBRE UNA LÍNEA RS-232.....	38
FIGURA 1.25.-CONECTORES RS-232 CON SUS RESPECTIVOS PINES.....	38
FIGURA 2.1.- ESQUEMA DE METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	40
FIGURA 2.2.- EQUIPO DE TERMOELECTRICIDAD POR CONTACTO.....	41
FIGURA 2.3.-GRAFICA DE CALIBRACIÓN DEL ESTAÑO POR MEDIO DEL POTENCIAL TERMOELÉCTRICO.....	41
FIGURA 2.4.- PROBETA DE COBRE CON INCLUSIONES METÁLICAS DE ESTAÑO.....	42
FIGURA 2.5.- UNIDADES DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	43
FIGURA 2.6.- PIEZA DE SOPORTE PARA LA PROBETA DE COBRE.....	44
FIGURA 2.7.- PERFIL PARA SUJETAR LOS SOPORTES DE LA PROBETA.....	45

FIGURA 2.8.- FILTRO (PASA BAJAS, ALTAS, BANDA) Y ACONDICIONADOR DE LA SEÑAL.	46
FIGURA 2.9.-MANIPULADOR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.	47
FIGURA 2.10.- SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO (FLUXGATE BARTINGTON).	48
FIGURA 2.11.-CODIGO DE PROGRAMACIÓN EN LENGUAJE G (LABVIEW)	49
FIGURA 2.12.- <i>PANEL PRINCIPAL PARA REALIZAR BARRIDO (AJUSTE DE POSICIÓN)</i>	51
FIGURA 2.13.-PANEL PRINCIPAL PARA REALIZAR BARRIDO (ESCANEО LINEAL).	51
FIGURA 2.14.- ESQUEMA DE BARRIDO (CIRCUITO).	52
FIGURA 2.15.-PANEL PRINCIPAL PARA REALIZAR BARRIDO (ESCANEО CIRCUITO).	52
FIGURA 2.16.-ESQUEMA DE BARRIDO (LINEAL).	54
FIGURA 2.17.-EQUIPO DE TERMOELECTRICIDAD DE NO CONTACTO.....	55
FIGURA 2.18.-EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS PARÁMETROS MACROESTRUCTURALES.....	56
FIGURA 3.1.-PROBETA DE COBRE CON INCLUSIONES DE ESTAÑO.....	58
FIGURA 3.2.-TEMPERATURAS ALCANZADAS HASTA SU ESTABILIZACIÓN.	60
FIGURA 3.3.- BARRA DE COBRE CON INCLUSIONES ARTIFICIALES DE ESTAÑO.....	61
FIGURA 3.4.- SEÑAL BIPOLAR PRODUCIDA POR CORRIENTES TERMOELÉCTRICAS ALREDEDOR DE UNA INCLUSIÓN DE ESTAÑO DE 1.27MM DE DIÁMETRO Y PROFUNDIDAD DE 10%	62
FIGURA 3.5.- SEÑAL BIPOLAR PRODUCIDA POR CORRIENTES TERMOELÉCTRICAS ALREDEDOR DE UNA INCLUSIÓN DE ESTAÑO DE 1.27MM DE DIÁMETRO Y PROFUNDIDAD DE 30% PARA UNA GANANCIA DE 50.	63
FIGURA 3. 6.- SEÑAL BIPOLAR PRODUCIDA POR CORRIENTES TERMOELÉCTRICAS ALREDEDOR DE UNA INCLUSIÓN DE ESTAÑO DE 1.27MM DE DIÁMETRO Y PROFUNDIDAD DE 50% PARA UNA GANANCIA DE 100.	63
FIGURA 3.7.-GRAFICA DE SEÑALES OBTENIDAS DEL ESCANEО DE UNA INCLUSIÓN DE 1.27MM DE DIÁMETRO CON EL 10% DE PROFUNDIDAD.	64
FIGURA 3. 8.-GRAFICA DE SEÑALES OBTENIDAS DEL ESCANEО DE UNA INCLUSIÓN DE 1.27MM DE DIÁMETRO CON EL 30% DE PROFUNDIDAD.	65
FIGURA 3.9.-GRAFICA DE SEÑALES OBTENIDAS DEL ESCANEО DE UNA INCLUSIÓN DE 1.27MM DE DIÁMETRO CON EL 50% DE PROFUNDIDAD.	65
FIGURA 3.10.-DISTRIBUCIONES DEL COMPONENTE NORMAL DEL CAMPO MAGNÉTICO TOMADO EN CUATRO DIFERENTES PLANOS PARALELOS A LA SUPERFICIE A DIFERENTES DISTANCIAS MUESTRA-SENSOR PARA UNA INCLUSIÓN SEMIESFÉRICA CON SU CENTRO EN LA SUPERFICIE.	67

Lista de Tablas

TABLA 2.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL COBRE Y DEL ESTAÑO. 39

TABLA 3. 1.-VALORES OBTENIDOS PARA H_0 Y B_0 60

RESUMEN:

En el presente trabajo se pretende mostrar al lector, que haciendo uso de una técnica novedosa como lo es la termoelectricidad de no contacto es posible realizar la detección de inclusiones metálicas induciendo un gradiente de temperatura controlado a través del material base. Dichas inclusiones fueron inclusiones cilíndricas de estaño en una barra de cobre, estas se realizaron de diferente tamaño (Tamaños) y a diferente profundidad: 10%, 30%, 50% del espesor total de la barra, para poder generar nuestro gradiente de temperatura en la barra de cobre, se le realizaron perforaciones en los extremos para que por ahí pudiera fluir en nuestro caso agua a una temperatura de +65°C (Extremo Caliente) y +5°C (Extremo Frío), generando un gradiente de temperatura de $\approx 3^\circ\text{C}/\text{cm}$.

Una vez obtenido nuestro gradiente de temperatura se procedió a realizar las lecturas de la densidad de flujo magnético generado en nuestras inclusiones, para realizar estas lecturas se utilizó un sensor de campo magnético (Fluxgate), el cual era movido sobre nuestra pieza a inspeccionar por medio de una mesa de dos grados de libertad (XY), a una distancia entre el sensor y la pieza de 1mm.

Para manejar el movimiento de nuestra mesa de dos grados de libertad utilizamos el software LabVIEW, por medio del cual manipulamos el tamaño del paso para nuestro desplazamiento en dirección X así como en la dirección Y, y las veces que se quiera realizar esta acción.

La generación de imágenes tipo C-Scan se realizó utilizando el programa Origin 8 en las cuales se observa de forma inmediata la representación de los flujos de campo magnético.

INTRODUCCION

Esencialmente todas las técnicas de termoelectricidad existentes en los ensayos no destructivos son basadas en el bien conocido efecto Seebeck que es comúnmente utilizado en termo pares para medir temperatura en la unión de dos diferentes conductores. Fue demostrado recientemente por Hinquen y Tavrín que las mediciones termoelectricas de autoreferencia pueden ser también hechas en una manera enteramente de no contacto utilizando detectores magnéticos de alta sensibilidad para medir corrientes termoelectricas débiles alrededor de las inclusiones y otro tipo de inhomogeneidades cuando el espécimen ha ser examinado está sujeto a un calentamiento o enfriamiento direccional []. Un diagrama esquemático del método de termoelectricidad de autoreferencia con un sensor magnético de no contacto es mostrado en la siguiente figura:

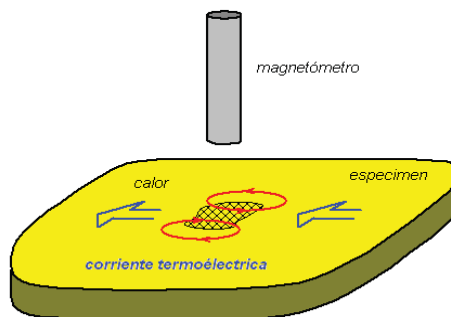


Figura 1.1.- Diagrama esquemático de no contacto de las imperfecciones del material por medio del monitoreo magnético de las corrientes termoelectricas.

Un calentamiento o enfriamiento externo es aplicado al espécimen para producir un gradiente de temperatura modesto en la región que va a ser probada. Como resultado, diferentes puntos de los alrededores entre material base y la inclusión estará a diferentes temperaturas, y también a diferentes potenciales termoelectricos. Esta diferencia de potencial producirá corrientes termoelectricas opuestas, dentro y fuera de la inclusión. Las corrientes termoelectricas forman dos lazos locales que corren en direcciones opuestas en los lados de la inclusión relativos al flujo de calor prevalente, los cuales pueden ser detectados escaneando el espécimen con un magnetómetro sensible.

JUSTIFICACION

En la actualidad existen muchas técnicas de Ensayos no destructivos para la determinación de defectos en los materiales como lo son: ultrasonido, rayos X. Corrientes de Eddy, Emisión Acústica, etc. Pero ahora se tiene esta nueva técnica que es Termoelectricidad de No Contacto, la cual ha tenido poco desarrollo, son pocos investigadores los que la manejan, y ellos han reportado buenos resultados con el uso de esta novedosa técnica de exploración la cual basa su funcionamiento en la detección de corrientes, denominadas corrientes termoelectricas. Estas corrientes son creadas cuando se tiene un gradiente de temperatura inducido en la pieza a explorar, basan su generación en lo que es el efecto Seebeck, son detectadas por medio del uso de un sensor de campo magnético (magnetómetro).

La potencialidad de esta técnica cubre la detección de defectos inclusiones, imperfecciones, esfuerzos residuales, textura, desgaste, etc. En materiales dentro del campo de la aeronáutica y aeroespacial. Cabe hacer mención que la potencialidad de esta técnica depende de un alto grado de la sensibilidad de los sensores utilizados afortunadamente en la actualidad existen una variedad de magnetómetros tales como: DSP (Spin Dependent tunneling), GMR (Giant Magneto-Resistive), Fluxgate, y el mas sensible de todos el SQUID (Superconductive QUantum Interference Device), el cual tiene su principal aplicación en el área de la medicina. Sin embargo se ha reportado trabajos referencias en el cual se ha utilizado este tipo de magnetómetro utilizando la técnica estudiada en este trabajo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general de este proyecto es realizar la digitalización de señales adquiridas dentro del campo de ensayos no destructivos, en particular con la técnica de termoelectricidad de no contacto, y generar imágenes tipo C-Scan utilizando como plataforma de desarrollo instrumentación virtual.

OBJETIVOS PARTICULARES

- † Inspeccionar piezas, de manera automática, mediante la generación de imágenes a partir de las señales digitalizadas en END (Termoelectricidad de no contacto).
- † Implementar la programación, de un manipulador de dos grados de libertad, mediante el paquete comercial LabVIEW.
- † Detección de inclusiones cilíndricas superficiales de Estaño dentro de una probeta de Cobre.

HIPOTESIS

Sera posible la detección utilizando un magnetómetro y la representación grafica en una imagen C-Scan utilizando el software Origin de las densidades de flujo magnético generadas por un gradiente de temperatura en las inclusiones metálicas de estaño en un barra de cobre utilizando el ensayo no destructivo de termoelectricidad de no contacto,

CAPITULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1.-TERMoelectricidad

El primer efecto termoelectrico fue descubierto por el físico alemán Thomas Johann Seebeck en 1821 ^[1]. Seebeck se dio cuenta de que una aguja metálica es desviada cuando se la sitúa entre dos conductores de materiales distintos unidos por uno de sus extremos y sometidos a una diferencia de temperatura. Este efecto es de origen eléctrico, ya que al unir dos materiales distintos y someterlos a una diferencia de temperatura aparece una diferencia de potencial. La principal aplicación práctica del efecto Seebeck es la medición de temperatura a través de termopares, es decir, medir diferencias de temperatura por medio de la f.e.m. producida por la unión (por fusión) de dos metales de composición diferente. Posteriormente, se demostró que ésta f.e.m. es en realidad producto de dos efectos diferentes:

- Uno resultante sólo del contacto entre dos metales disímiles y la temperatura en dicha unión. Este es el llamado “Efecto Peltier” y es debido a la difusión de electrones desde el conductor con mayor densidad electrónica al de menor densidad.
- Otro, debido a los gradientes de temperatura a lo largo de los conductores en el circuito. Este es el llamado “Efecto Thompson” y es debido al flujo de calor entre los extremos de los conductores, que es transportado por los electrones, induciendo entonces una f.e.m. entre los extremos de los mismos.

En la mayoría de los casos, la f.e.m. Thompson es bastante pequeña en comparación con la f.e.m. Peltier y, dependiendo de los materiales elegidos para el termopar, la f.e.m. Thompson puede ser despreciada.

Históricamente, se llamó efecto Seebeck a la combinación de los efectos Thompson y Peltier. En realidad, esto sería así si no hubiera gradientes de

temperatura en la zona aledaña a las uniones del termopar. Sin embargo, de tipo espacial se manifiesta, por ejemplo cuando el termopar esta en presencia de un campo magnético. En general se considera el efecto del campo sobre la fem desarrollada en las uniones solamente; sin embargo los gradientes de temperaturas generados a lo largo de los cables, son responsables de diferencias de potencial que en algunos casos son más apreciables y deben por lo tanto ser tomados en cuenta.

En la mayoría de los casos, considerar los efectos Peltier y Thompson sumados es aceptable como una buena aproximación del efecto Seebeck.

La mayoría de las tablas sobre termopares dan valores de voltajes en función de temperatura. Sin embargo, existen tablas que dan valores del coeficiente Seebeck en función de la temperatura.

Unos años más tarde, en 1834, el físico francés Jean-Charles ^[1] Peltier descubrió el segundo efecto termoeléctrico: en la unión de dos materiales diferentes sometidos a una corriente eléctrica aparece una diferencia de temperaturas.

El físico inglés William Thomson ^[2] (Lord Kelvin) demuestra en 1851 que los efectos Seebeck y Peltier están relacionados: un material sometido a un gradiente de temperatura y recorrido por una corriente eléctrica intercambia calor con el medio exterior. Recíprocamente, un material sometido a un gradiente de temperatura y recorrido por un flujo de calor genera una corriente eléctrica. La diferencia fundamental entre los efectos Seebeck y Peltier considerados por separado y el efecto Thomson es la existencia de este último en un único material, sin necesidad de que exista una unión entre materiales distintos.

La termoelectricidad es definida como la conversión directa del calor en energía eléctrica o viceversa, en materiales conductores, mediante los diferentes fenómenos como el efecto Seebeck, efecto Thomson y el efecto Peltier.

1.2.-EFECTO SEEBECK

Para explicar este efecto, consideremos una barra de aluminio que es calentada por un extremo y enfriada por el otro extremo como se muestra en la *figura 1.1*. Los electrones en la región caliente tienen mayor energía y por lo tanto tienen mayores velocidades que los de la región fría. Por consiguiente, hay una difusión neta de electrones del extremo caliente hacia el extremo frío, lo cual deja iones metálicos positivos expuestos en la región caliente y una acumulación de electrones en la región fría. Esta situación prevalece hasta que el campo eléctrico desarrollado entre los iones positivos de la región caliente y el exceso de electrones en la región fría, impide un nuevo movimiento de electrones del extremo caliente hacia el extremo frío. Por consiguiente, se desarrolla un voltaje entre los extremos caliente y frío, donde el extremo caliente presenta el potencial positivo. La diferencia de potencial ΔV a través de la pieza del metal debida a la diferencia de temperatura ΔT es llamada efecto Seebeck.

Para medir la magnitud de este efecto se introduce un coeficiente especial el cual es definido como la diferencia de potencial desarrollado por unidad de diferencia de temperatura, *i.e. Coeficiente Seebeck*:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1.1)$$

Por convención, el signo de S representa el potencial en el lado frío con respecto al lado caliente. Si los electrones se difunden del extremo caliente al frío, entonces el lado frío es negativo con respecto al lado caliente y el coeficiente Seebeck es negativo. El coeficiente S (Seebeck) es referido como el potencial termoeléctrico, aunque este término es ciertamente engañoso puesto que se refiere a la diferencia de voltaje en lugar de la potencia.

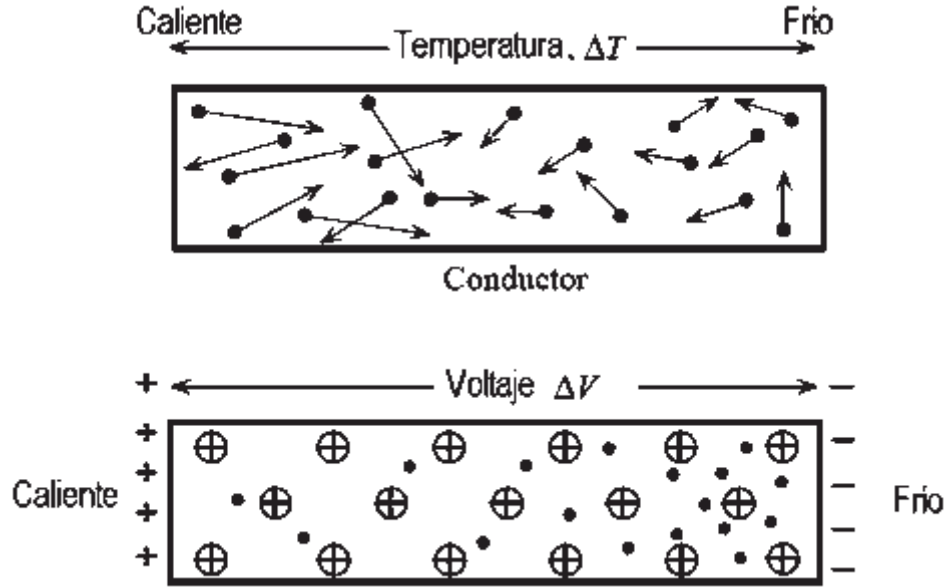


Figura 1.2.- Efecto Seebeck. Gradiente de temperatura en un conductor.

El coeficiente Seebeck es una propiedad del material que depende de la temperatura: $S = S(T)$ y se encuentra en tablas para muchos materiales. Dado el coeficiente Seebeck $S(T)$ para un material, la diferencia de voltaje entre dos puntos donde las temperaturas son T_0 y T , de la ecuación (1.2), está expresado por:

$$\Delta V = \int_{T_0}^T S dT \quad (1.2)$$

Esta diferencia de voltaje en la ecuación (1.2), es para el extremo frío con respecto al extremo caliente la convención para S .

La energía promedio E_{av} por electrón en un metal, en el cual los estados de densidad se aproximan a $g(E) \propto E^{1/2}$ esta dada por [2]:

$$E_{av}(T) = \frac{3}{5} E_{FO} \left[1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_{FO}} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

Donde E_{FO} es la energía de Fermi a cero Kelvin. Esta ecuación permite determinar la energía promedio por electrón, y es determinada por la ecuación (2.3). Debemos notar que la energía promedio por electrón determinada por la ecuación anterior, también depende del material en virtud de E_{FO} .

Si se considera una pequeña longitud δx sobre la cual la diferencia de temperatura es δT y la diferencia de voltaje δV . Se puede suponer que un electrón se difunde de la región caliente a la fría a través de esta diferencia de potencial. Entonces, una pequeña diferencia de temperatura de δT resulta en una diferencia de voltaje δV entre los electrones acumulados y los iones metálicos positivos expuestos como se describe en la *figura 1.2*.

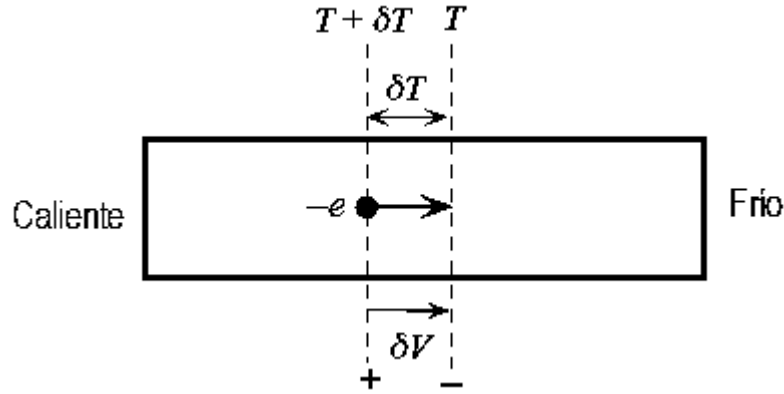


Figura 1.3.- Difusión de un electrón.

Si un electrón difunde de la región caliente a la región fría. Este tiene que realizar trabajo contra la diferencia de potencial δV , lo cual es $-e\delta V$. Este trabajo hecho contra δV disminuye la energía promedio del electrón por δE_{av} de $E_{av}(\text{caliente})$ a $E_{av}(\text{frío})$:

$$-e\delta V = E_{av}(T + \delta T) - E_{av}(T) \quad (1.4)$$

Sustituyendo por $E_{av}(T)$ de la ecuación (1.3) y expandiendo $(T + \delta T)$ y descuidando el término δT^2 obtenemos:

$$-e\delta V \approx \frac{\pi^2 k^2 T \delta T}{2E_{FO}} \quad (1.5)$$

Ya que $S = \delta V / \delta T$, *Coeficiente Seebeck de Metales* esta dado por ^[2]:

$$S \approx -\frac{\pi^2 k^2 T}{2eE_{FO}} \quad (1.6)$$

1.3.-TÉCNICA CONVENCIONAL DE TERMoeLECTRICIDAD

La termoelectricidad es causada por el transporte de calor y de electricidad en metales, esto nos dirige a un numero interesante de fenómenos, algunos de los cuales son utilizados en los ensayos no destructivos (END) y caracterización de materiales. Esencialmente todos los métodos existentes de termoelectricidad en END son basados en el bien conocido efecto Sebeeck, que es comúnmente utilizado en termopares para medir temperatura en la unión de dos conductores diferentes. La *figura 1.3* muestra el diagrama esquemático de la medición termoelectrica más utilizado en la caracterización no destructiva de materiales. Uno de los electrodos de referencia es calentado utilizando una corriente eléctrica a una temperatura preestablecida T_h , la temperatura de esta punta es establecida mientras que la otra permanece fría a temperatura ambiente T_c . La medición es realizada rápidamente para asegurar que el electrodo de referencia caliente, no reduzca su temperatura y que el resto del espécimen no se caliente de manera perceptible. La medida del voltaje termoelectrico esta dado por ^[3]:

$$V = \int_{T_c}^{T_h} [S_S(T) - S_R(T)] dT = \int_{T_c}^{T_h} S_{SR}(T) dT \quad (1.7)$$

Donde T es la temperatura, S_S y S_R denotan los potenciales termoelectricos absolutos del espécimen y del electrodo de referencia, respectivamente. Cualquier variación en las propiedades del material puede afectar la medida del voltaje termoelectrico como:

$$S_{SR} = S_S - S_R \quad (1.8)$$

El cual representa el potencial termoeléctrico relativo del espécimen a medir con respecto al electrodo de referencia. En la mayoría de los casos, el voltaje termoeléctrico puede ser aproximadamente igual a:

$$V \approx (T_h - T_c) S_{SR} \quad (1.9)$$

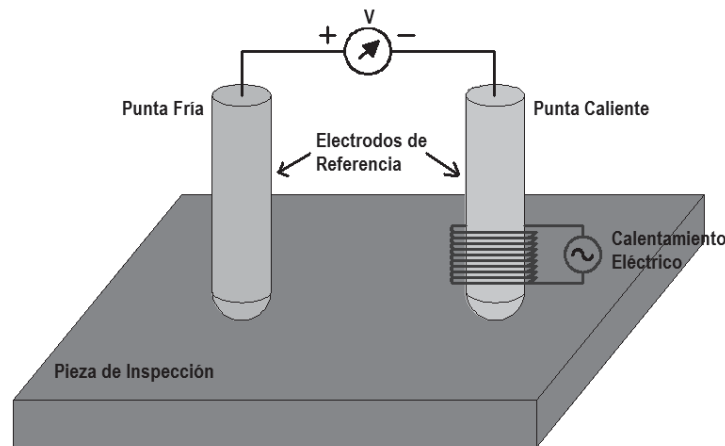


Figura 1.4.- Diagrama esquemático de la medición termoeléctrica.

Idealmente, no importa cuan alta sea la diferencia de temperatura entre las uniones, solo los termopares de diferentes materiales, o más precisamente, materiales de diferente potencial termoeléctrico, podrán generar una señal termoeléctrica.

El potencial termoeléctrico de los metales es sensible a las propiedades de los materiales y puede afectar su medición, claramente, la composición química ejerce el efecto mas fuerte en las propiedades termoeléctricas y en consecuencia la aplicación básica de la caracterización de materiales por termoelectricidad es el ordenamiento de metales ^[4]. Sin embargo es conocido que los materiales con idéntica composición química bajo condiciones especiales, pueden también producir un eficiente termopar como resultado de diferentes tratamientos: térmicos, dureza, textura, esfuerzo residual, fatiga del material, etc. Que pueden ser explotados por algunas de las técnicas de END ^[5-8].

Como se mencionó anteriormente, la suposición fundamental en los END por termoelectricidad es que, la medición de voltaje puede ser incierta algunas veces debido a las variaciones de temperatura en el contacto, los materiales idénticos no producen voltaje termoeléctrico. Consecuentemente pequeñas diferencias en el potencial termoeléctrico pueden ser inequívocamente detectadas por un electrodo de referencia compuesto de un material similar al que se va estudiar. Sin embargo, el inherente contactó entre el espécimen y el electrodo de referencia puede producir una característica señal termoeléctrica, aún si los electrodos para la medición son de un material muy similar al del espécimen. Esta compensación termoeléctrica puede ser reducida más no eliminada, reduciendo la resistencia térmica y eléctrica entre el espécimen y el electrodo de referencia (e.g., vía una mejor limpieza de la superficie del material ó incrementando la presión de contacto entre el electrodo y la superficie del material).

La presencia de este contacto imperfecto limita la detectabilidad de pequeñas variaciones en las propiedades del material por la técnica convencional de termoelectricidad de no contacto. Cuando pequeñas variaciones subsuperficiales tales como textura, daño por fatiga, o impurezas son detectadas, la mejor sensibilidad puede ser dada utilizando los alrededores intactos del material base como electrodo de referencia. Sino que también elimina los problemas causados por el contacto imperfecto entre el material ha ser analizado y los electrodos de referencia, lo que se utiliza comúnmente en la técnica termoeléctrica de no contacto ^[3].

1.4.-TÉCNICA TERMOELÉCTRICA DE NO CONTACTO

La técnica por termoelectricidad de no contacto utiliza los alrededores intactos del material como punta de referencia proveyendo una interface perfecta entre el material ha ser analizado y los alrededores del mismo. En el método termoeléctrico de autoreferencia las inclusiones y otro tipo de in homogeneidades del material naturalmente forman termopares en el espécimen y, en presencia de un gradiente de temperatura direccional inducido externamente, estos “termopares” producen corrientes termoeléctricas alrededor de las inclusiones y

pueden ser detectadas por medio del flujo magnético B por medio de sensores magnéticos desde una distancia significativa entre el sensor y la inclusión, como se muestra en la *figura 1.4* ^[9].

Cuando se enfría o calienta el espécimen para producir un gradiente de temperatura en la región que va a ser estudiada. Se tiene como resultado, diferentes puntos entre los bordes del material y la inclusión los cuales estarán a diferente temperatura, así como también a un diferente potencial termoeléctrico. Esta diferencia de potenciales producirá corrientes termoeléctricas opuestas dentro y fuera de la inclusión. Las corrientes termoeléctricas forman dos lazos locales que se encuentran en direcciones opuestas en los dos lados de la inclusión relativo al flujo de calor prevalente, los cuales se pueden detectar escaneando la pieza con un magnetómetro muy sensitivo ^[3].

Cuando el espécimen es escaneado con un magnetómetro muy sensible, así como los detectores Fluxgate o el SQUID, los campos magnéticos producidos por estas corrientes termoeléctricas pueden ser detectados aún cuando las inclusiones se encuentren dentro y el sensor se encuentre a una distancia considerable del espécimen. Utilizando un sensor de flujo magnético y estando éste a una distancia significativa entre la superficie de la imperfección en la pieza y el sensor.

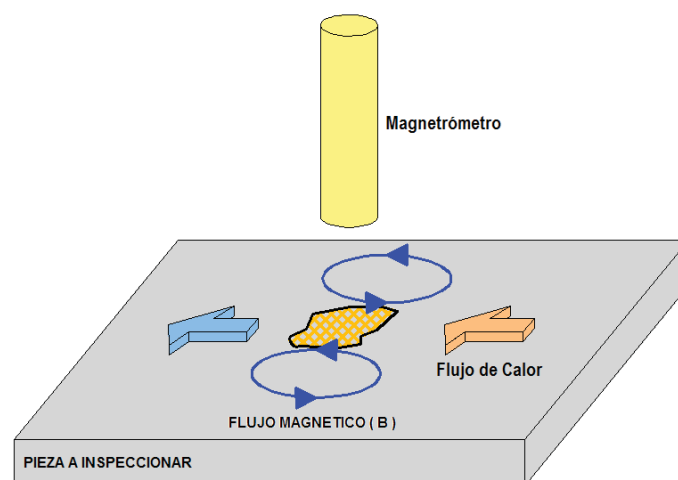


Figura 1. 5.- Esquema de la técnica de termoelectricidad de no contacto.

1.4.1. Definición de términos del fenómeno de termoelectricidad

La termoelectricidad es el resultado del transporte acoplado intrínsecamente de electricidad y calor en los metales. La densidad de corriente eléctrica $\mathbf{j}$ y el flujo térmico $\mathbf{h}$ producido por una combinación dada de distribuciones de potencial electroquímico Φ y temperatura T dadas por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{j} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & \varepsilon \\ \bar{\varepsilon} & \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\nabla\Phi \\ -\nabla T \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Donde σ es la conductividad eléctrica medida a una temperatura uniforme, κ es la conductividad térmica para un campo eléctrico igual a cero, además ε y $\bar{\varepsilon}$ son los coeficientes termoelectrónicos acoplados y pueden ser expresados por el potencial termoelectrónico absoluto S de el material como $\varepsilon = \sigma S$ y $\bar{\varepsilon} = \sigma S T$ [10]. La conductividad térmica cuando se tiene un campo eléctrico de cero κ puede ser fácilmente expresada por la conductividad térmica del material para una corriente eléctrica de cero, κ_0 , el cual es algunas veces mas fácil de determinar experimentalmente, como $\kappa = \kappa_0 + \sigma S^2 T$. La diferencia entre estas dos conductividades térmicas es debida al acoplamiento termoelectrónico en el material. Podemos decir que $\kappa = \kappa_0 (1 + \eta)$, donde $\eta = \sigma S^2 T / \kappa_0$ es un factor dimensional que proviene de la lectura de la fuerza de acoplamiento entre los transportes térmico y eléctrico. Para metales, el factor de acoplamiento es relativamente pequeño algo entre 10^{-3} y 10^{-2} .

El flujo total de energía $\mathbf{h} + \Phi \mathbf{j}$ incluido el flujo térmico mas un termino adicional representando el cambio del potencial electroquímico de los electrones. El rango en el cual el calor es aumentado, por unidad de volumen, en cualquier punto del material es $\nabla \cdot \mathbf{h} + \nabla \Phi \cdot \mathbf{j}$, donde utilizamos la ley de Maxwell como $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$. Si nosotros asumimos que los coeficientes de acoplamiento ε y $\bar{\varepsilon}$ son pequeños al igual que sus cuadrados individuales y productos pueden ser discriminados, también para la carga térmica podemos despreciar $\nabla \Phi \cdot \mathbf{j}$ y, para el estado estable, podemos concluir que $\nabla \cdot \mathbf{h} \approx 0$ [3].

Para ejemplificar el campo magnético bipolar producido por corrientes termoeléctricas fluyendo alrededor de la inclusión, consideremos el caso de una inclusión superficial esférica en el arreglo geométrico como se muestra en la *figura 1.4*. Para simplificar los cálculos numéricos, todas las coordenadas espaciales fueron normalizadas a el radio de la inclusión esférica como $\xi = x / a$. El campo magnético puede también ser escrito en forma normalizada como $H = H_0 F(\xi)$ donde $H_0 = ah_0 G_s$ que combina el tamaño de la inclusión a , el contraste termoeléctrico G_s , y el flujo de calor inducido externamente h_0 en una simple constante escalar que caracteriza la fuerza del campo magnético mientras que $F(\xi)$ es una función espacial de distribución para todas las inclusiones esféricas. La estimación del valor absoluto de la fuerza del campo magnético puede ser escrita como:

$$H_0 = -a \nabla T \sigma S_{SR} \Gamma_s \quad (1.11)$$

Donde a es el radio de la inclusión, ∇T es el gradiente de temperatura inducido externamente, σ la conductividad eléctrica del material base, $S_{SR} = S' - S$ el potencial termoeléctrico relativo de la inclusión con respecto al material base, y Γ_s es coeficiente normalizado de contraste termoeléctrico determinado por el radio entre la conductividad eléctrica y térmica del material base y de la inclusión. Para el caso de inclusiones esféricas:

$$\Gamma_s = \frac{3}{\left(1 + 2 \frac{\sigma}{\sigma'}\right) \left(2 + \frac{\kappa'}{\kappa}\right)} \quad (1.12)$$

Y para el caso de inclusiones cilíndricas el coeficiente normalizado de contraste es:

$$\Gamma_c = \frac{2}{\left(1 + \frac{\sigma}{\sigma'}\right) \left(1 + \frac{\kappa'}{\kappa}\right)} \quad (1.13)$$

Donde: κ Conductividad térmica del material base.

κ' Conductividad térmica de la inclusión.

σ Conductividad eléctrica del material base.

σ' Conductividad eléctrica de la inclusión. [11]

La técnica termoelectrica de no contacto para la detección de imperfecciones en los materiales por medio del monitoreo de las corrientes termoelectricas se explico por medio de la *figura 1.4* sin embargo, se puede esperar cualitativamente que el flujo de las corrientes termoelectricas producidas por el gradiente de temperatura en la interfase inclusión- metal base serán en direcciones opuestas a lo largo de dos corrientes alrededor de la inclusión relativa a la dirección del flujo térmico de esta manera el campo magnético será asimétrico. Esto es corroborado por [12]. Ya que la distribución del campo magnético permanece muy similar independientemente de la distancia muestra-sensor los autores seleccionaron dos parámetros llamados el pico del campo magnético y la mitad de ancho, entre estos picos para caracterizar cualitativamente la distribución del campo magnético producido por la técnica termoelectrica de no contacto, la *figura 1.5* muestra estos dos parámetros como función de la distancia muestra-sensor normalizada con respecto al diámetro de la inclusión. Las líneas solidas son resultados numéricos mientras que las líneas punteadas son asíntotas del campo lejano. Como se puede observar de la *figura 1.5* a mayor distancia muestra-sensor se ve un decremento en el campo magnético pico mientras se ve un ensanchamiento en el campo magnético detectado [12].

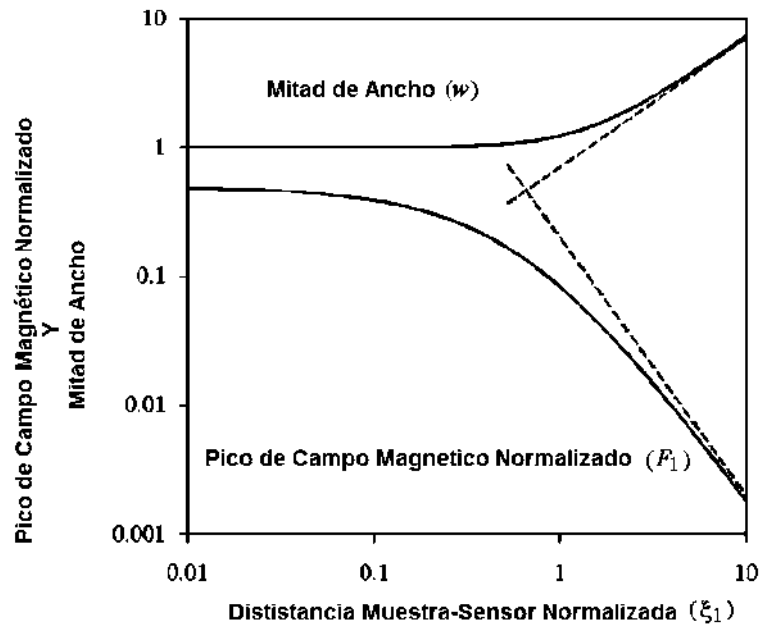


Figura 1. 6.- El pico del campo magnético normalizado y la mitad de ancho entre picos como función de la distancia normalizada entre el sensor-Muestra. Las líneas continuas son predicciones numéricas y las líneas punteadas son asíntotas del campo lejano.

Como se mencionó anteriormente la técnica de termoelectricidad de no contacto es muy versátil ya que se han realizado estudios como los de Xavier Kleber ^[13], en los cuales utiliza una técnica de detección alternativa, la cual tiene un potencial para detectar inclusiones metálicas superficiales y subsuperficiales, i.e. mediciones por medio de potencial termoeléctrico. La idea es generar un circuito termoeléctrico entre el material estudiado y una punta la cual tiene la temperatura regulada ^[14]. Un gradiente de temperatura es inducido y localizado justo debajo de la punta. Por medio del efecto termoeléctrico, un voltaje es generado entre el material y la punta. El conocimiento de este voltaje así como del gradiente de temperatura nos da acceso al potencial termoeléctrico local. Si la inclusión metálica es localizada en el gradiente termal, se deduce que el potencial termoeléctrico es modificado, y la inclusión es detectada. El conocimiento de uno de los dos potenciales termoeléctricos permite la determinación del segundo básicamente, para el dispositivo de potencial termoeléctrico, una unión es realizada por una pequeña pieza de cobre la cual no tiene la temperatura regulada (figura 1.7). Su rol es determinar la temperatura T_f y el potencial eléctrico (Φ_f del

material a ser medido [15,16]. Este es referido como el electrodo frío. El segundo tiene una forma de cono truncado y está también hecho de cobre. Su temperatura regulada (T_m) usando un elemento calentador que es referido como la de potencial termoelectrico.

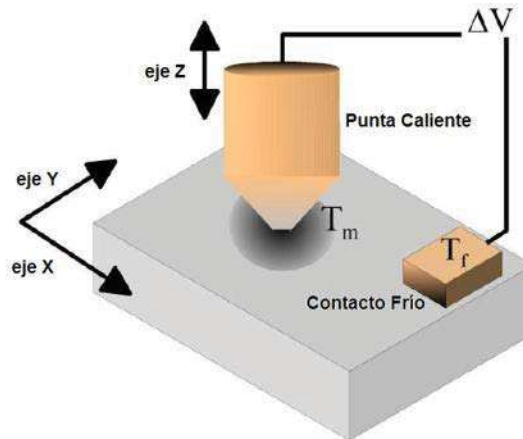


Figura 1.7.-Diagrama Esquemático del potencial termoelectrico (Punta Caliente).

La superficie de contacto es un círculo con un diámetro que puede ser cambiado, por ejemplo mecanizado de la punta. Por razones prácticas este valor es generalmente seleccionado entre $150\ \mu\text{m}$ y $2800\ \mu\text{m}$. Para sus experimentos utilizaron una punta con un diámetro de $800\ \mu\text{m}$. Haciendo uso de un motor en la dirección Z y un sensor de fuerza para que el contacto entre el material y la punta fuera perfectamente controlada. Con la ayuda de una mesa XY, las mediciones del potencial termoelectrico pudieron realizarse a diferentes posiciones por lo tanto, un mapa de la pieza con respecto a los potenciales termoelectricos pudo ser generado.

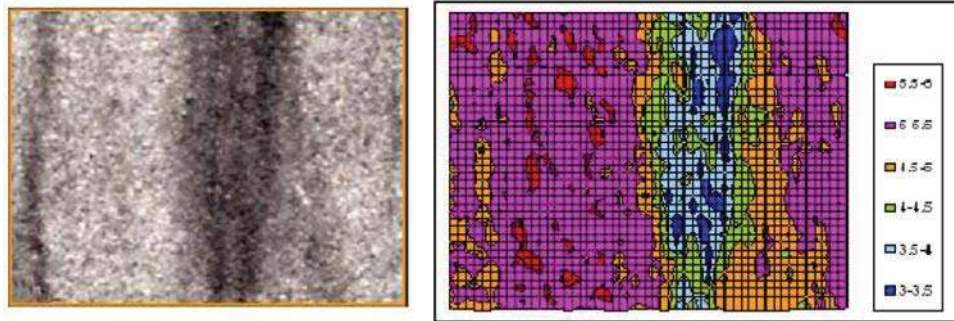


Figura 1.8.- Micrografía de Acero Ferrítico (Izquierda). Mapa del Potencial Termoeléctrico correspondiente a la zona (4mmx5mm).

Como se mencionó antes se utilizó el dispositivo de potencial termoeléctrico para detectar heterogeneidades localizadas en la superficie del material. Como el potencial termoeléctrico es muy sensitivo a la composición química ^[17] las mediciones por medio del potencial termoeléctrico tienen el potencial de detectar áreas segregadas, como se puede observar en las imágenes anteriores.

Como conclusión ellos mencionan la técnica por medio del potencial termoeléctrico puede satisfactoriamente ser utilizada para la detección de heterogeneidades y de inclusiones. No sólo partículas superficiales pueden ser detectadas sino también las subsuperficiales. Las ventajas principales de esta técnica son:

- 1.- La posibilidad de detectar inclusiones metálicas (heterogeneidades) en una matriz metálica con una sensibilidad más significativa que su conductividad eléctrica. Solamente la diferencia en las propiedades termoeléctricas son importantes.
- 2.- Una alta sensibilidad para inclusiones localizadas cerca de la superficie.
- 3.- La posibilidad de probar diferente tamaño en inclusiones utilizando el diámetro apropiado de la punta caliente.

Desde un punto de vista práctico las mediciones por potencial termoeléctrico son relativamente simples, rápidas y muy precisas y son independientes de la geometría de la muestra.

Este método de medición es muy utilizado para caracterizar de precipitaciones cinéticas de carbón ^[18] y de nitrógeno ^[19] en aceros, y precipitaciones cinéticas de cobre en aleaciones de aluminio ^[20]. En este trabajo, se ha estudiado un acero ferrítico que contiene áreas segregadas macroscópicas enriquecidas con elementos aleantes. Estas segregaciones hacen que el acero sea similar a un material de dos fases. Usualmente, para determinar el potencial termoeléctrico de un material, dos uniones reguladas en su temperatura son formadas entre la muestra y los dos metales (referencia), a causa del efecto Seebeck, una diferencia de potencial aparece entre las dos uniones, la medición de esta diferencia de potencial y el conocimiento de las dos temperaturas hacen posible el conocer el potencial termoeléctrico de la muestra utilizando la siguiente relación:

$$S_{\text{Muestra}} - S_{\text{Referencia}} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1.17)$$

Donde $S_{\text{Referencia}}$ es el potencial termoeléctrico del material de referencia, que se supone es conocido. Para incrementar la eficacia de la medición, las muestras son generalmente de forma rectangular y tienen una sección pequeña (figura 1.10).

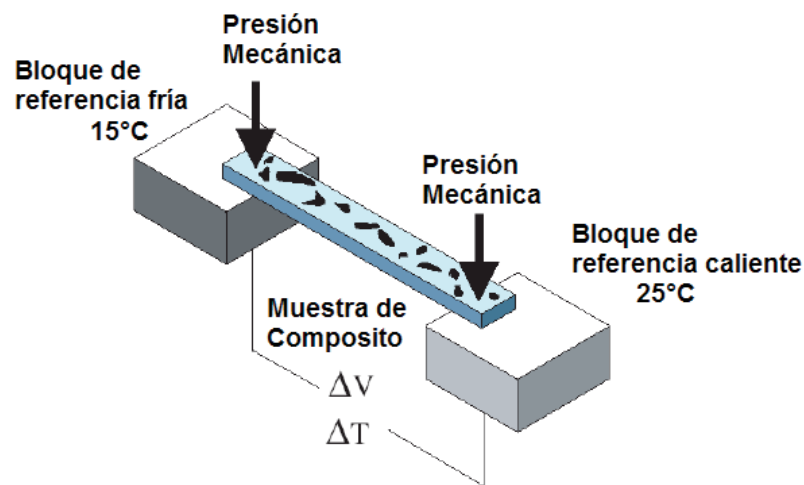


Figura 1.9.- Esquema de medición del PTE (Potencial Termoeléctrico).

La aplicación de un gradiente de temperatura a lo largo de esta estructura es inducida causando por medio del efecto termoeléctrico, un gradiente de potencial y una muy pequeña corriente que son distribuidas en la estructura. El potencial termoeléctrico macroscópico (*figura 1.10*), referido al potencial termoeléctrico de un bloque de cobre resultan la siguiente relación:

$$S_{\text{Composito}} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{T_2 - T_1} \quad (1.18)$$

Donde Φ_1 y Φ_2 son respectivamente, el potencial promedio del contacto frío y caliente, y T_1 y T_2 son la temperatura promedio de las uniones fría y caliente. Para determinar el potencial termoeléctrico resultante es necesario calcular la distribución de temperatura y de potencial a lo largo de la estructura ^[21].

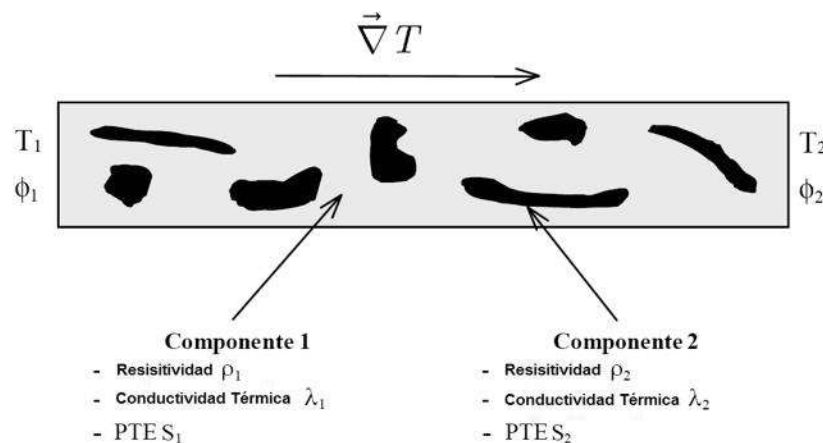


Figura 1.10.- Muestra de un compuesto de un material de dos diferentes fases.

Laurence Simonet, Xavier Kleber ^[21], proponen una forma teórica para el cálculo de los diferentes potenciales termoeléctricos a lo largo de la muestra en el cual consideran solamente un caso en dos dimensiones. Considerándolo como un problema de aproximación por diferencias finitas. Discretizan un espacio en 2D utilizando una malla a base de cuadros de dimensiones $h \times h$. Cada cuadro es representado por sus coordenadas (i, j) y delimitado por una superficie en la cual la temperatura $T_{i,j}$ y el potencial $\Phi_{i,j}$ son constantes (*figura 1.11*). Las propiedades termoeléctricas para cada cuadro dependen de la consideración del material en el punto (i, j) . Los valores correspondientes son $\lambda_{i,j}$, $S_{i,j}$ y $\sigma_{i,j}$.

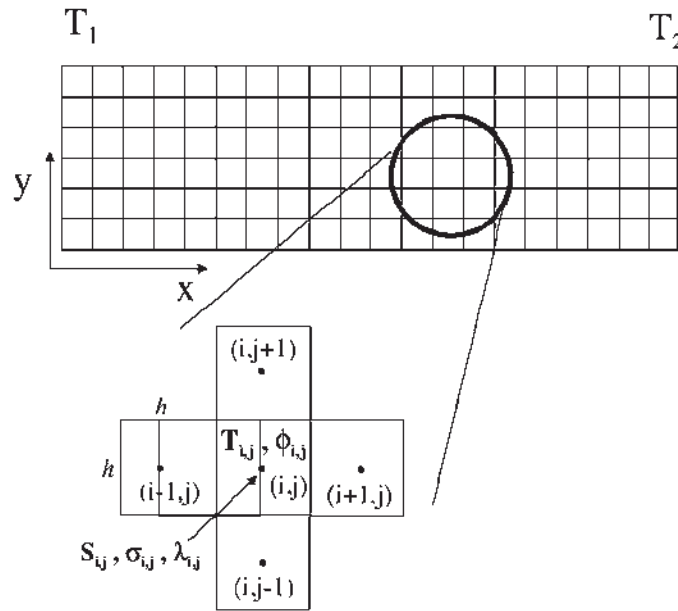


Figura 1.11.-Discretización del compuesto muestra.

Es bien conocido que la técnica de electricidad de no contacto es muy sensitiva a la presencia de inclusiones, cuando el potencial termoeléctrico de la región afectada es significativamente diferente al del medio que lo rodea [22-25]. En el método de termoelectricidad de autoreferencia las imperfecciones del material naturalmente forman termopares con el espécimen, y en presencia de un gradiente de temperatura inducido externo, estos termopares innatos producen corrientes termoeléctricas alrededor de las imperfecciones que pueden ser detectadas midiéndolas por medio de la densidad de flujo magnético B por sensores magnéticos a una distancia significativa entre el sensor y la superficie de la imperfección.

Por lo cual el Doc. Héctor Carreón utilizó este método en materiales de la industria aeroespacial. En particular es muy importante para el desarrollo de las técnicas de END para materiales de alta dureza, alta temperatura, tales como aleaciones a base de titanio, por esta razón él estudió inclusiones *hard alfa* con diferente contenido de nitrógeno en Ti-6AL-4V. Como muchos de estos materiales a base de aleaciones de titanio tienen poca conductividad eléctrica y térmica y son más significativas las inhomogeneidades microestructurales y la textura anisotrópica que un cobre de una fase [26].

Actualmente las inclusiones *hard alfa* pueden ser detectadas solamente si contienen fracturas o poros. Esto significa que una inclusión *hard alfa* no fracturada y una con poros pasarían sin ser detectadas y representarían un mayor problema se han utilizado varios métodos no destructivos para la evaluación de este tipo de inclusiones tales como ultrasonido y emisión acústica, por lo cual el autor propone esta alternativa de método no destructivo para la caracterización de especímenes con nitrógeno enriquecido. Utiliza cuatro especímenes con inclusiones de Tin con diferentes contenidos de nitrógeno, fueron cortados de un bloque TI-6AL-4V con las mismas dimensiones 15.5 x 15.5 x 25mm, las inclusiones de Tin tienen forma cilíndrica con un diámetro de aproximadamente 0.19mm y una profundidad de 0.19mm, cada espécimen fue montado en dos soportes de cobre los cuales fueron perforados y sellados para los intercambiadores de calor [26].

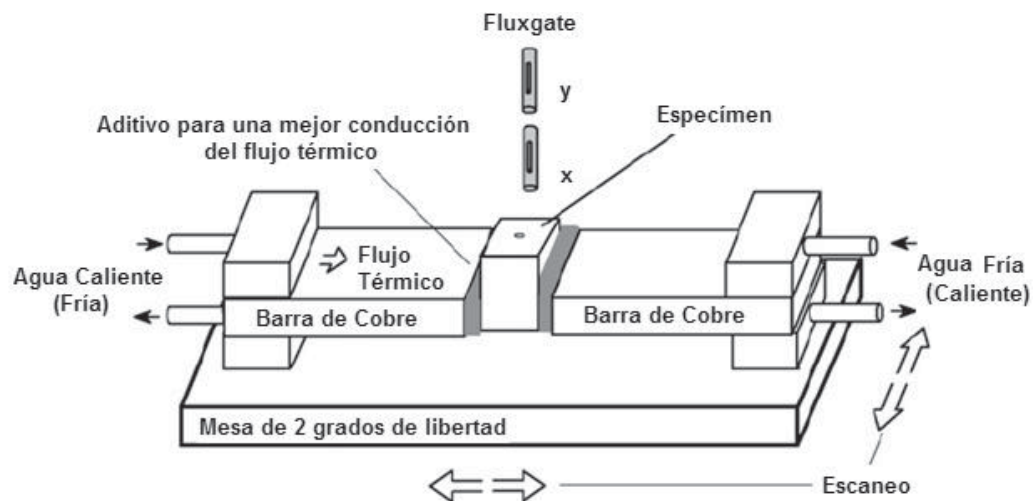


Figura 1.12.- Esquema de funcionamiento de la técnica de termoelectricidad de no contacto.

Estas muestras necesitaron de un gradiente de temperatura de $12^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, por lo cual los intercambiadores de calor fueron colocados a una temperatura de 85°C y 10°C respectivamente. Las lecturas obtenidas fueron realizadas por medio de dos sensores Fluxgate, la distancia entre el primer sensor y la superficie de la muestra fue de 2mm.

En conclusión, las mediciones preliminares demostraron claramente que la técnica de termoelectricidad de no contacto para la caracterización de materiales es muy poderosa. Las mediciones de densidad de flujo magnético fueron sensitivas a los cambios en el contenido de nitrógeno con excepción de las propiedades intrínsecas del material (background), las mediciones termoelectricas de no contacto de las imperfecciones y de las inclusiones se ven afectadas por el dichas propiedades del material. Este background es causado por la anisotropía, textura e inhomogeneidades del espécimen ^[27,4]. Como se puede observar en la siguiente figura se muestran imágenes de la densidad de flujo magnético a diferentes porcentajes de nitrógeno en el material ^[26].

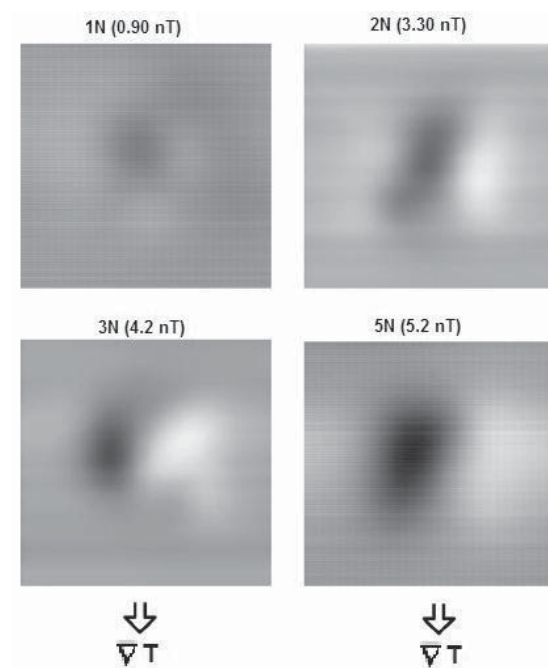


Figura 1.13.-Imágenes de inclusiones de titanio con diferente contenido de nitrógeno ($\nabla T \approx 12^\circ\text{C}/\text{cm}$, 2mm de distancia entre la pieza y el sensor, 76.2mm x 76.2 mm de dimensión de escaneo).

1.5.-SENSORES MAGNÉTICOS

La fiabilidad de las mediciones termoelectricas por no contacto crucialmente dependen de la sensibilidad del magnetómetro. Afortunadamente, como resultado de los recientes avances tecnológicos en los sensores magnéticos de alta sensibilidad, el estado del arte de magnetómetros tales como el detector GMR (Giant Magneto-Resistive), los detectores SDP (Spin Dependent tunneling), Fluxgates y, especialmente, los magnetómetros SQUID (Superconductive QUantum Interference Device), se ha vuelto factible para llevar a cabo mediciones que van de 1 -10pT en frecuencias del orden de 0.1 y 20Hz. La *figura 1.14* muestra el espectro típico de ruido entre 0.1 y 20 Hz para varios sensores magnéticos disponibles en el mercado. Por supuesto, que la fuerza del campo magnético depende en gran medida de la naturaleza física y de las dimensiones de la imperfección. En comparación, con un gradiente de temperatura ($\approx 1\text{-}10^\circ\text{C/cm}$) muchas de las inhomogeneidades producen densidades de flujo magnético alrededor de $10 - 10^5 \text{ pT}$ ^[28]. Con tal sensibilidad, la detección de corrientes termoelectricas por no contacto nos conducirá indudablemente a numerosas aplicaciones dentro de los END en particular, la reciente adaptación de magnetómetros SQUID para la detección de corrientes termoelectricas por medio de la técnica de no contacto. Aunque la viabilidad de esta técnica completamente nueva en estas aplicaciones no ha sido estudiada todavía con suficiente detalle científico y muy pocos resultados analíticos y experimentales han sido publicados en la literatura abierta, queda muchísima prueba, que aun en su infancia, la 5técnica propuesta trabaja muy bien en todas estas aplicaciones ^[29,30].

El Fluxgate Bartington Instruments Mag -03 tiene un umbral de limitador de ruido de $\approx 2.5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ y un ancho de banda de 0.1 a 20Hz. La máxima salida de voltaje es limitada a $\pm 12\text{V}$, correspondiendo a un valor detectable de campo de fuerza de $\pm 120 \text{ }\mu\text{T}$ con una sensibilidad del sensor de $(10\mu\text{T}/1\text{V})$. Solamente el SQUID puede proveer un rango sensible mucho menor cerca de $0.1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ sin ninguna amplificación de la resolución espacial. El sensor GMR provee una mejor resolución espacial pero su campo de sensibilidad es muy pequeño. Aunque el transductor SQUID provee muchas características deseables, su costo y su

sistema de refrigeración todavía lo hacen poco accesible. Por otra parte los fluxgates tienen algunas ventajas (gran campo de sensibilidad, linealidad, rango dinámico, robustez) sobre otros sensores disponibles en el mercado, por lo tanto son utilizados en un amplio rango de aplicaciones tales como mediciones en el espacio exterior (satélites), aplicaciones navales y terrestres e.g. la detección de submarinos y la observación geomagnética respectivamente ^[31].

Los sensores Fluxgate miden la fuerza absoluta alrededor del campo magnético en una frecuencia entre DC y menos de 100Hz. El sensor en si consiste en un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad con una bobina primaria que periódicamente satura el núcleo. La respuesta del campo es detectada por una bobina de compensación opuesta a la bobina primaria. El Fluxgate utiliza una señal filtrada de la frecuencia de excitación del núcleo. Esta señal que es una señal filtrada por medio de un filtro pasa bajas, sincrónicamente detecta y controla la corriente de retroalimentación que fluye en el campo de la bobina de compensación, resultando en un voltaje proporcional a esta corriente que es digitalizada como la lectura del campo magnético externo a lo largo de los ejes magnéticos del sensor ^[31]. El principio de operación del magnetómetro Fluxgate es basado en la ley de Faraday, dada por:

$$V = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.14)$$

Donde:

$$\phi = \int_{\text{superficie}} B \cdot dA \quad (1.15)$$

Donde (V) representa el voltaje inducido que es proporcional a la tasa de cambio de la densidad de flujo magnético dado por $(d\phi / dt)$.

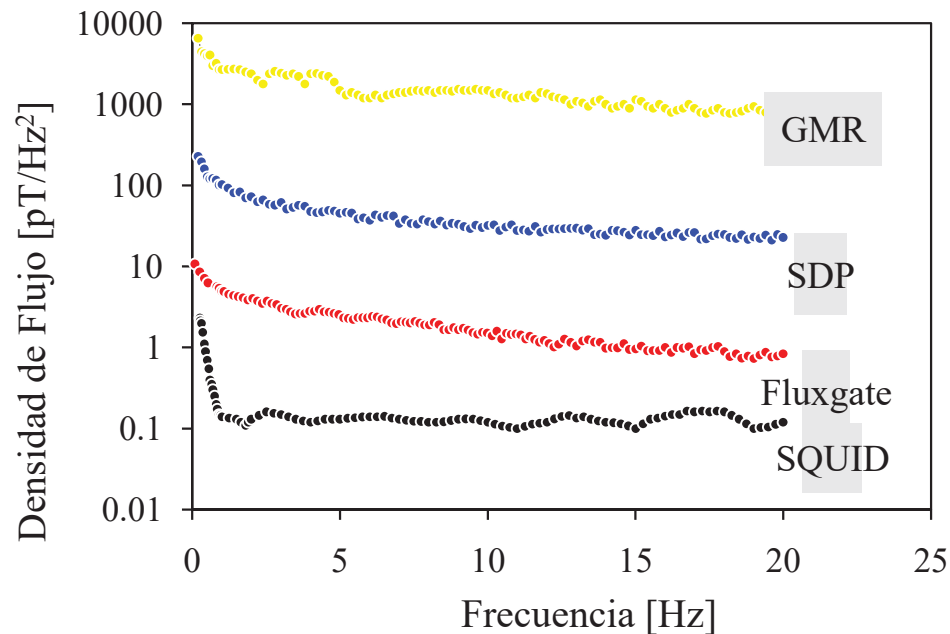


Figura 1. 14.- Espectro típico de ruido para diferentes sensores magnéticos.

GMR: La magneto resistencia gigante (Giant Magnetoresistance Effect ó GMR) es un efecto mecánico cuántico que se observa en estructuras de película delgada compuestas de capas alternadas ferromagnéticas y no magnéticas. Se manifiesta en forma de una bajada significativa de la resistencia eléctrica observada bajo la aplicación de un campo magnético externo: cuando el campo es nulo, las dos capas ferromagnéticas adyacentes tienen una magnetización antiparalela puesto que están sometidas a un acoplamiento ferromagnético débil entre las capas. Bajo efecto de un campo magnético externo, las magnetizaciones respectivas de las dos capas se alinean y la resistencia de la multicapas cae de manera súbita ^[32].

FLUXGATE: En años recientes, el sistema de sensores Fluxgate se ha incrementado de forma importante para la medición de campos magnéticos. Se ha convertido en el instrumento de elección para diferentes aplicaciones, incluyendo desarrollo de programas de agronomía, geofísica del fondo del océano, y la medición de campos magnéticos interplanetarios. Aunado a sus ventajas ya que es económico de fabricar, y tiene pocos requerimientos de potencia ^[33].

SQUID: Acrónimo de *Superconducting QUantum Interference Device* (Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica). Un SQUID consiste básicamente en un toroide de material superconductor con una pequeña discontinuidad, que se conoce como *unión Josephson*. Mediante un proceso puramente cuántico puede usarse un SQUID para medir variaciones casi infinitesimales en los campos magnéticos, y por extensión, pequeñas oscilaciones de voltaje, intensidad de corriente y susceptibilidad magnética.

Los SQUIDs se utilizan ya hoy en día de forma experimental, especialmente debido al hecho de que no poseemos todavía superconductores realmente eficientes. Si estos materiales fuesen asequibles para trabajar a temperatura ambiente permitirían construir muchos sensores ultrasensibles para detectar submarinos desde la órbita, efectores electromagnéticos, etc.

El SQUID es un transductor que convierte el flujo magnético a voltaje. El voltaje de salida es periódico con el flujo magnético, con un periodo de oscilación de un cuanto de flujo magnético $\Phi_0 = h/2e \approx 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ ^[30]. De esta forma es posible detectar señales correspondientes a un cambio en el flujo menores que Φ_0 . Para su funcionamiento el SQUID combina dos fenómenos físicos: cuantización del flujo magnético; el flujo magnético Φ en un circuito superconductor cerrado está cuantizado en unidades de Φ_0 y el efecto túnel de Josephson. El SQUID DC consiste de dos uniones Josephson conectadas en paralelo en un circuito superconductor, se le llama así porque opera con una corriente de DC^[34].

Funcionamiento: El SQUID DC es como el que se muestra en la *figura 1.15*, consta de dos uniones Josephson conectadas en paralelo para formar una especie de arandela.

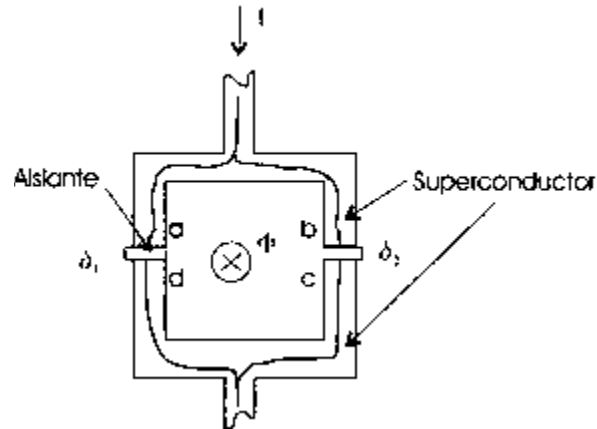


Figura 1.15. Uniones Josephson conectadas en paralelo. I es la corriente de alimentación, Φ es el flujo magnético externo, δ_1 y δ_2 son las diferencias de fase de la corriente a través de las uniones.

En el arreglo mostrado existe una función de onda de los pares electrónicos común, tanto en la parte superior como inferior del arreglo. Para un arreglo simétrico, y en ausencia de un campo magnético externo, las diferencias de fase son las mismas a través de las uniones. Cuando un campo magnético es aplicado perpendicularmente al plano del arreglo aparece una diferencia de fase entre las uniones.

Si las corrientes críticas I_{c1} e I_{c2} son iguales, se puede derivar la siguiente expresión,

$$I = 2I_{c1} \cos\left(\frac{\pi\Phi_{ext}}{\Phi_0}\right) \quad (1.16)$$

La constante $\Phi_0 = h/2e \approx 2.07 \text{ fWb}$ corresponde al cuanto del flujo magnético. Si alimentamos el SQUID con una corriente constante y aplicamos un flujo magnético uniforme al interior del circuito de la figura, el voltaje a través del SQUID oscila con un periodo dado por $n\Phi_0$ ($0, 1, 2, \dots$), si el campo externo se incrementa lentamente da como resultado un voltaje cuyo periodo, es múltiplo de $n\Phi_0$ lo que permite medir campos magnéticos menores que un cuanto de flujo magnético. En la figura se muestra un sensor SQUID ^[34]

1.6.-CONTROL DE MOVIMIENTO DE MOTORES A PASOS

Los motores a pasos son muy utilizados en sistemas digitales, por ejemplo el mecanismo que arrastra el papel de la impresora, o los que mueven el brazo de un robot. Se observa que en estas situaciones se requiere de un control preciso de la trayectoria a seguir por el eje de un motor. Los motores a pasos proporcionan una considerable ventaja sobre los motores de corriente continua (CD) el eje de un motor a paso gira a intervalos regulares en lugar de hacerlo continuamente, como sucede con los de CD. La velocidad de un motor de CD viene expresada en revoluciones por minuto (rpm) y es función del voltaje, la corriente por el motor y carga mecánica del mismo, un posicionamiento preciso de un motor de CD no es posible por modos sencillos.

Un motor a pasos gira por una secuencia de pulsos aplicados a sus devanados. El eje del motor gira un determinado ángulo por cada impulso de entrada. Cada pulso provoca la rotación del rotor del motor en un incremento de ángulo preciso, denominado paso, de ahí el nombre de “motor paso a paso”, el resultado de este movimiento, fijo y repetible, es un posicionamiento preciso y fiable. Los incrementos de pasos de la rotación del rotor se traducen en un alto grado de control de posicionamiento ^[35].

Consideremos primeramente, la bobina A-A', la cual se energiza haciendo circular la corriente de A hacia A' por lo cual el polo superior se polariza positivamente, atrayendo al polo sur del rotor (parte superior del rotor), y el inferior negativamente el cual atrae, al polo norte del rotor, (parte inferior del rotor). La bobina B-B', no se energiza (Figura 1.15).

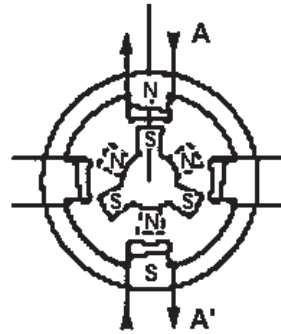


Figura 1.16.-Energizado de la bobina A hacia A'.

Para realizar el primer paso en sentido de las manecillas del reloj, sea la bobina B-B', ahora alimentada y la bobina A-A' desactivada. Haciendo circular la corriente de B hacia B', el polo de la derecha se polariza positivamente atrayendo al polo sur del rotor (parte superior del rotor), y el de la izquierda negativamente, el cual atrae, al polo norte del rotor, (parte inferior del rotor), de tal manera que realiza su primer paso (figura 1.16).

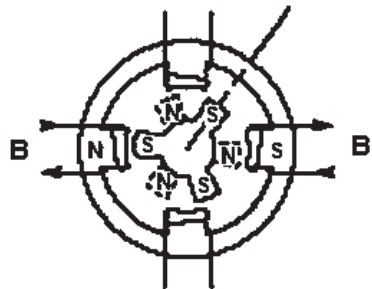


Figura 1.17.-Energizado de la bobina B hacia B'.

Para que realice un segundo paso en el mismo sentido consideremos, ahora, la desactivación de la bobina B-B' y nuevamente la activación de las bobinas A-A', pero ahora haciendo circular la corriente de A' hacia A por lo cual el polo superior se polariza negativamente, atrayendo al polo norte del rotor (parte inferior del rotor), y el inferior positivamente el cual atrae, al polo sur del rotor, (parte superior del rotor).

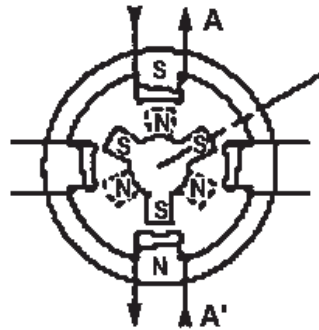


Figura 1.18.-Energizado de la bobina A' hacia A.

Siguiendo con un tercer paso en el mismo sentido, sea la bobina B-B', ahora alimentada en sentido contrario es decir haciendo circular la corriente de B' hacia B, con la bobina A-A' desactivada. El polo de la derecha se polariza negativamente atrayendo al polo norte del rotor (parte inferior del rotor), y el de la izquierda positivamente, el cual atrae, al polo sur del rotor, (parte superior del rotor).

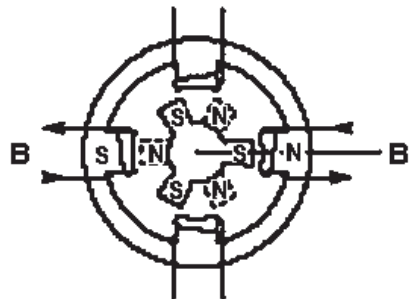


Figura 1.19.-Energizado de la bobina B' hacia B.

1.7.-SISTEMAS ANALÓGICOS

Los sistemas analógicos se configuran enteramente con componentes que miden, transmiten, muestran o registran datos solo en forma analógica. En general, todos esos sistemas completamente analógicos encuentran su mayor empleo en aplicaciones que necesiten un amplio ancho de banda, o cuando se puede tolerar menor exactitud. También tienden a ser menos complejos que los sistemas convertidores de señales de analógico a digital, pero, como resultado de ello, no pueden manejar un volumen tan grande o complejidad en los datos de entrada ^[37].

Los sistemas analógicos contiene típicamente algunos o todos los elementos siguientes:

1. Fuentes de señal (de las cuales hay dos clases generales):

- a). Elementos que producen señales como resultado de la medición directa de cantidades eléctricas por ejemplo: voltaje, corriente, resistencia, frecuencia, etc.
- b). Dispositivos que convierten parámetros no eléctricos en una señal eléctrica (Transductores).

2. Elementos de acondicionamiento de señal analógica. La señal analógica del transductor raramente es de forma adecuada para registrarse o mostrarse directamente. Generalmente debe primero pasar por una serie de procesos de acondicionamiento de la señal antes de mostrarse. Esos procesos pueden ser algunos o todos los siguientes: Amplificación, filtrado, linealización, corrimiento y amortiguación. El equipo de acondicionamiento de señal en los sistemas de instrumentación se diseña para llevar a cabo esas funciones. El proceso de amplificación (y algunas veces de amortiguación) se lleva a cabo mediante amplificadores electrónicos ^[36].

3. Instrumentos de medición e indicación, como osciloscopios, medidores analógicos, etc.

4. Instrumentos de registro grafico, como los registradores de cartas.

5. Registradores analógicos de cinta magnética

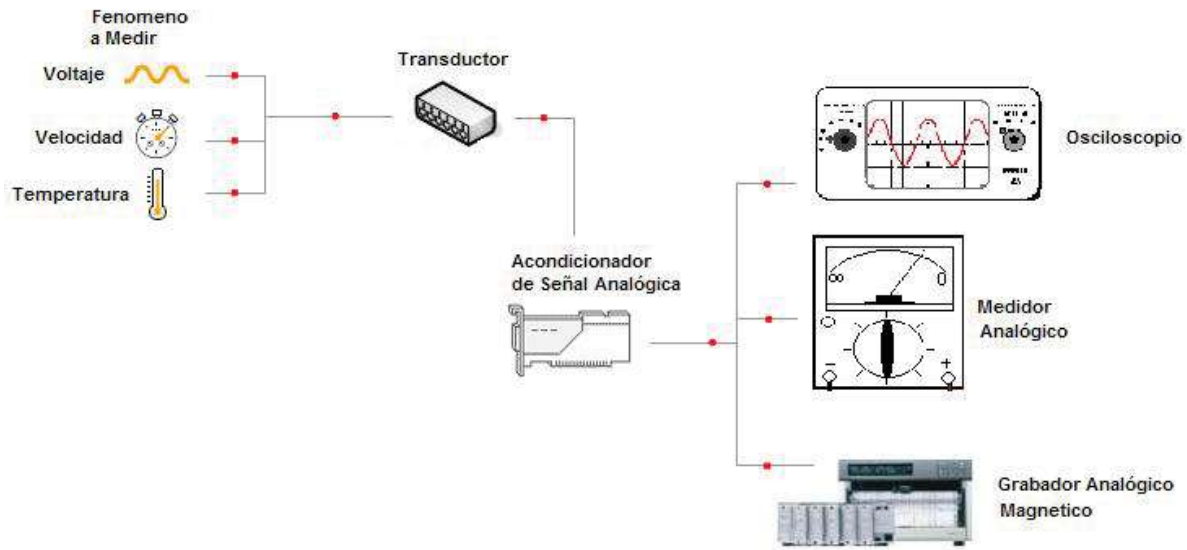


Figura 1. 20.-Sistema de adquisición analógico.

En la *figura 1.20* se muestra un ejemplo sencillo de ese sistema de instrumentación totalmente analógico. Un transductor de temperatura a voltaje (un termopar) detecta la temperatura que se mide (entrada analógica) y la transforma en una señal de voltaje (salida analógica). La señal analógica de voltaje se transmite a uno o mas de los instrumentos analógicos de medición o registro que se muestran (osciloscopio, registrador de cartas, grabadoras de cinta magnética o medidor analógico). En este sistema, todo acondicionamiento de señal que amplifique o modifique de cualquier manera la señal de interés se hace en forma analógica mediante los instrumentos analógicos de medición o registro.

Para interconectar adecuadamente todos los elementos de los sistemas analógicos se deben resolver los problemas tales como: igualación de impedancias y carga, susceptibilidad a la captación de ruido cuando los datos son transmitidos del transductor al instrumento, aterrizaje adecuado, circuitos de tierra e interferencia asociada a los circuitos de tierra, incompatibilidad de la fuente de señal y los instrumentos de medición (por ejemplo en términos de sensibilidad, respuesta a la frecuencia, etc .) a menos que los diseñadores de un sistema específico de instrumentación comprendan los requisitos que surgen debido a las

condiciones de interconexión y aseguren que se cumplan todas, no se puede garantizar que el sistema de medición lleve a cabo correctamente la tarea para la cual fue diseñado. También se debe recordar que las mismas consideraciones de interconexión para los sistemas analógicos se deben tomar en cuenta en los segmentos analógicos de los sistemas analógicos a digitales.

Los sistemas de medición en los cuales los datos medidos se adquieren en forma analógica, pero a continuación se convierten a forma digital antes de mostrarlos, registrarlos o transmitirlos, tienen un uso muy amplio. Con más frecuencia se emplean cuando la señal eléctrica o el proceso físico que se está monitoreando presenta un estrecho ancho de banda (un ejemplo sería una señal o proceso que varíe lentamente con el tiempo), y cuando se necesita de gran exactitud. Los sistemas sencillos analógicos a digitales pueden contener únicamente un canal. Los sistemas analógicos a digitales más complejos pueden contener muchos canales de entrada. Estos sistemas de múltiples canales pueden medir un gran número de parámetros de entrada, comparar los datos contra límites o condiciones preestablecidas y llevar a cabo cálculos y decisiones basados en los datos de entrada. En general, los sistemas analógicos a digitales son más complejos que sus contrapartes totalmente analógicas, pero también poseen capacidades más amplias y mejores de manejo de datos.

Además las características superiores de manejo de datos de los sistemas analógicos a digitales, tienen otra ventaja muy importante sobre los sistemas totalmente analógicos: la de una inmunidad mucho mayor a la captación de ruido de señales transmitidas en forma digital. El ruido eléctrico se capta fácilmente y las señales analógicas de bajo nivel se pueden modificar dramáticamente durante la transmisión, aun cuando se sigan prácticas cuidadosas del blindaje.

Por otro lado, los datos digitales se pueden transmitir exactamente debido a la diferencia de voltaje entre los estados de “cero lógico” y de “uno lógico” y de un sistema digital, generalmente es muy superior a la amplitud del ruido eléctrico captado por la línea de transmisión por ejemplo, si las señales digitales se transmiten en los niveles de “uno lógico” = 5 V y “cero lógico” = 0 V, una captación

de ruido de ± 1 V superpuesta sobre cualquiera de los estados lógicos no causaría ningún error en la transmisión de datos digitales. Así, en un sentido práctico, no hay límite a la precisión con la que se puede transmitir los datos digitales.

Además, el costo de los componentes que llevan a cabo la conversión de señales analógicas a forma digital ha decrecido dramáticamente debido a que ha sido muy redituable incorporar el uso de esas técnicas de conversión en virtualmente todo tipo de instrumentación ^[36].

Un sistema análogo a digital puede contener alguno o todos los elementos siguientes:

1. La fuente de señal (señal eléctrica directa o de transductor).
2. Un multiplexor (En los sistemas multicanal). Acepta las entradas múltiples y las conecta a un dispositivo único de medición.
3. Acondicionador de señal (Amplificación, Filtrado, Linealización de datos, etc.)
4. Circuito de muestreo y retención. Muestra la salida del acondicionador de señal a un determinado tiempo y mantiene el nivel de voltaje en su salida hasta que el convertidor analógico a digital lleva a cabo su operación de conversión.
5. Convertido analógico a digital.
6. Dispositivo de control de sistema- Puede ser una computadora o una calculadora programable, etc.

Un ejemplo de un sistema analógico a digital más complejo es el sistema de adquisición y conversión de datos que se muestra en la *figura 1.21* ^[36].

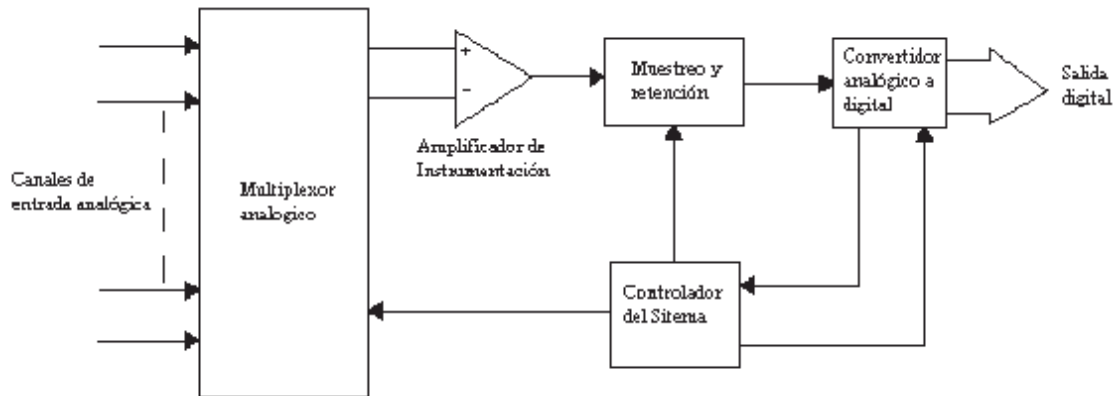


Figura 1.21.- Configuración de un sistema de medición multicanal analógico a digital.

1.8.-COMUNICACIÓN SERIAL RS-232

La transmisión de datos a grandes distancias se hace muy cara si se trata de hacerlo en paralelo. Sin embargo, si los datos se transmiten en serie, solo se necesita un trayecto de datos porque estos se mandan en forma de un solo bit a la vez. En vista del hecho de que el trayecto único de datos en serie solo necesita de dos conductores se mantienen bajos los costos de cableado. Además, el trayecto solo necesita un procesador transmisor para enviar la salida de los datos y un procesador receptor para registrar la entrada. Por lo tanto, cuando se deben transmitir a grandes distancias, la selección obvia es la interfase en serie; a esto se suma que mediante dispositivos como el MODEM, la comunicación se pueda extender a cualquier lugar del planeta.

Los métodos de transmisión en serie también se caracterizan por la transmisión de cuatro bits por segundo (*1 bit/s se le llama Baud*). Por lo tanto, un sistema que tenga una velocidad de 110 bauds puede transmitir, por ejemplo, 10 caracteres de 11 bits por segundo. Las velocidades de bits normalizadas en los sistemas en serie son de 50, 75, 110, 134.5, 150, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 3600, 4800, 9600, 19200, 38400 y 56000 (puerto serie UART 8250) bauds.

La mayor parte de la interconexión en serie en los sistemas de instrumentación se lleva a cabo en forma asíncrona. La velocidad se logra a costa de una mayor complejidad del sistema. Como las menores velocidades de transmisión que dan los métodos asíncronos en serie generalmente son

adecuadas para la mayor parte de las aplicaciones de instrumentación, no hay necesidad de complicar esos sistemas pidiendo se adopten métodos de transmisión sincrónica.

Existen dos formas de comunicación serial: la sincrónica y la asincrónica. En la comunicación sincrónica, además de una línea sobre la que se transfieren los datos, se necesita otra que contenga pulsos de reloj que indiquen cuándo un dato es válido; la duración del bit está determinada por la duración del pulso de sincronismo. En la comunicación asincrónica, los pulsos de reloj no son necesarios y se acude a otros mecanismos para realizar la lectura / escritura de los datos; la duración de cada bit está determinada por la velocidad con la cual se realiza la transferencia de datos.

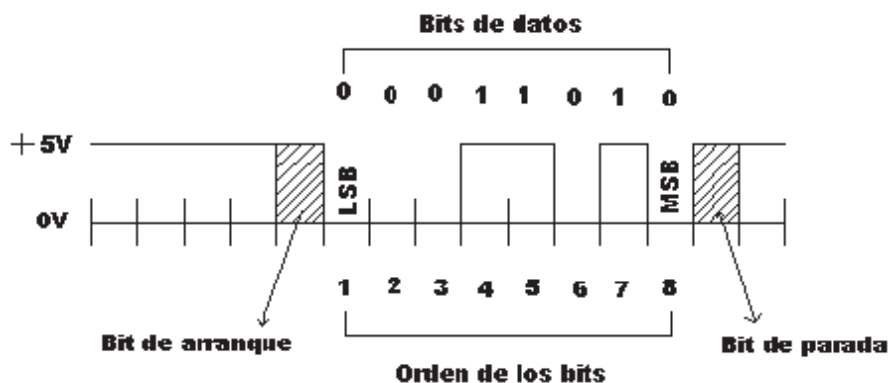


Figura 1.22.- Estructura de un carácter que se transmite por puerto serie.

La *figura 1.22* muestra la estructura de un carácter que se transmite de forma asíncrona. Normalmente, cuando no se realiza ninguna transferencia de datos, la línea del transmisor es pasiva (*idle*) y permanece en un estado alto. Para empezar a transmitir datos, el transmisor coloca esta línea en bajo durante el tiempo de un bit lo cual se conoce como bit de arranque (*start bit*) y a continuación, empieza a transmitir con el mismo intervalo de tiempo los bits correspondientes al dato (que pueden ser 7 u 8 bits) empezando, por el menos significativo (*LSB*), y terminando con él más significativo (*MSB*).

Al finalizar se agrega un bit de paridad, si es que esta activada esta opción, y los bits de parada que pueden ser uno o dos en los cuales la línea regresa a un

estado alto. Al concluir esta operación el transmisor estará preparado para transmitir el siguiente dato.

El receptor no está sincronizado con el transmisor y desconoce cuando va a recibir datos. La transición de alto a bajo de la línea del transmisor activa el receptor y éste genera un conteo de tiempo de tal manera que realiza una lectura de la línea medio bit después del evento; si la lectura realizada es un estado alto, asume que la transición ocurrida fue ocasionada por ruido en la línea; si por el contrario, la lectura es un estado bajo, considera como válida la transición y empieza a realizar lecturas secuenciales a intervalos de bit hasta conformar el dato transmitido. El receptor puede tomar el bit de paridad para determinar la existencia o no de errores y realizar las acciones correspondientes, al igual que los bits de parada para situaciones similares. Lógicamente, tanto el transmisor como el receptor deberán tener los mismos parámetros de velocidad, paridad, número de bits del dato transmitido y de bits de parada [37].

En los circuitos digitales, cuyas distancias son relativamente cortas se pueden manejar transmisiones en niveles lógicos TTL (0-5volts), pero cuando las distancia aumentan estas señales tienden a degradarse debido al efecto capacitivo de los conductores y su resistencia eléctrica, el efecto se incrementa a medida que se incrementa la velocidad de transmisión. Todo esto origina que los datos recibidos no sean iguales a los transmitidos, lo que no se puede permitir en una transferencia de datos. Una de las soluciones más inmediata en este tipo de situaciones es aumentar los márgenes de voltaje con que se transmiten los datos, de tal manera que las perturbaciones causadas se puedan minimizar e incluso ignorar.

Ante la gran variedad de equipos, sistemas y protocolos que existen surgió la necesidad de un acuerdo que permitía que los equipos de varios fabricantes pudieran comunicarse entre sí. A principios de los años 60 se desarrollaron varias normas que pretendían hacer compatibles los equipos, pero en 1962 se publicó en lo que se convirtió en la más popular: la norma RS-232. Esta norma define la interface mecánica, las características, los pines, las señales y los protocolos que

debía cumplir la comunicación serial. La norma ha sufrido algunas revisiones, como la RS-232C en 1969 y la EIA/TIA-232E en 1991.

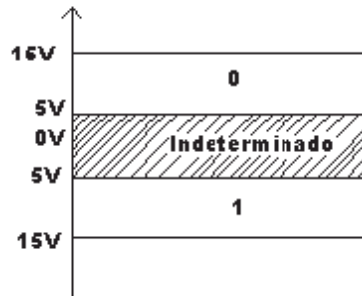


Figura 1.23.- Niveles de voltaje RS-232

De todas maneras, todas las normas RS -232 cumplen básicamente con todos los niveles de voltaje, como se puede observar en la *figura 1.23*.

- Un uno lógico es un voltaje comprendido entre $-5V$ y $-15V$ en el transmisor y entre $-3V$ y $-25V$ en el receptor.
- Un cero lógico es un voltaje comprendido entre $5V$ y $15V$ en el transmisor y entre $3V$ y $25V$ en el receptor.

Por lo tanto, deben existir dispositivos que permitan convertir niveles TTL a niveles RS-232 y viceversa. Los primeros dispositivos utilizados fueron los *drivers* MC1488 y los *receivers* MC1489 de Motorola, de los que se desarrollaron versiones mejoradas como los SN75188, SN75189 de Texas Instruments y algunos similares de otros fabricantes. Todos los dispositivos nombrados anteriormente necesitan 3 Voltajes diferentes para su operación cuando el equipo actúa como transmisor y receptor, lo cual no representa ningún problema en las computadoras tipo PC, ya que se disponen de estos voltajes en la fuente.

Se debe tener presente que la norma RS-232 fue desarrollada hace mas de 30 años, época en la cual los requerimientos y las capacidades de los equipos eran diferentes. En la actualidad esta norma es un poco limitada, tanto para la distancia a la cual se puede transmitir, como para la velocidad y número de transmisores y receptores que pueden estar simultáneamente conectados. Existen otras normas para la comunicación serial, en la cual se incrementa el número de transmisores o

receptores, la velocidad de transmisión, la distancia, etc. Pero a pesar de esto los principios rectores siguen siendo los mismos de la comunicación asíncrona y de la interfase RS-232 ^[37].

1.8.1.-Aspectos prácticos de una comunicación serial

El envío de niveles lógicos (bits) a través de cables o líneas de transmisión necesita la conversión a voltajes apropiados. En un circuito lógico o con microprocesador se trabaja con niveles de voltaje inferiores a 0.8 para representar el valor lógico 0 y voltajes mayores a 2.0 para representar el valor lógico 1. Por lo general, cuando se trabajan con familias TTL y CMOS se asume que un “0” es igual a cero volts y un “1” a +5V.

Cuando la comunicación que se pretende hacer es muy corta, se pueden conectar directamente el transmisor y el receptor para hacer la transferencia de bits usando los mismos niveles lógico tradicionales de 0 y 5V. Pero cuando la distancia es mayor a los 2 metros, la información digital se afecta notablemente por acción de la atenuación en el cable, el ancho de banda del mismo, y la velocidad con que se transmite. La interfase RS-232C es una de las diferentes soluciones que hay para esta situación. Básicamente consiste en cambiar los niveles lógicos de la salida o envío de 0 y 5V a dos niveles de voltaje de magnitud mayor: uno positivo (+V) para representar el cero lógico y uno negativo (-V) para representar el uno lógico. En el equipo receptor de la información se realiza el proceso contrario, los niveles positivos y negativos que lleguen se convierten a los niveles lógicos tradicionales de 0 y 5V, *figura 6*. Los niveles de voltajes son simétricos con respecto a tierra y son al menos de +3V para el “0” binario y -3V para el “1”. En la *figura 1.24* se muestra un ejemplo de transmisión de un carácter sobre la línea RS-232, incluyendo sus respectivos niveles de voltaje.

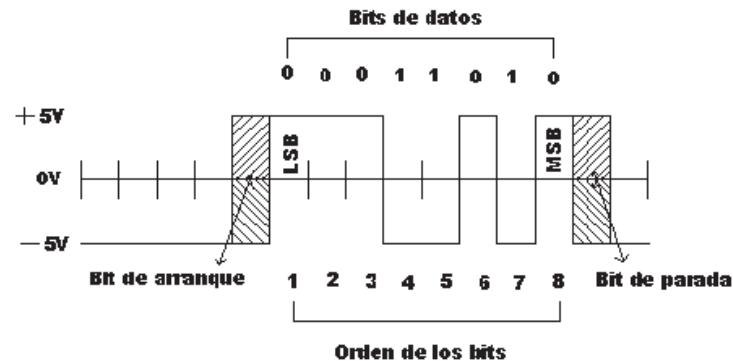


Figura 1.24.-Señal presente sobre una línea RS-232.

En la práctica, los niveles de voltaje los determinan las fuentes de alimentación que se apliquen a los circuitos de la interfase; los niveles más comunes son desde +12 V hasta +15 V. Una interfase RS-232 está compuesta por el circuito transmisor que convierte la señal de bajo voltaje del equipo lógico a los niveles de voltaje alto que se necesitan en la línea de transmisión y un receptor que realiza la función inversa. En los manuales de circuitos integrados se llama *line drivers* y *line receivers*, respectivamente, a los circuitos que ejecutan esta conversión de niveles de voltaje.

Por lo general, se utiliza con las interfases RS-232 cable multipar o cable ribbon con un solo conductor como referencia de tierra. El ruido que se capta a través de la línea aún puede originar problemas. Para reducir el efecto que suele conectar un condensador en paralelo con la salida del circuito del transmisor. Según la reglamentación, los estándares de la interfase RS-232 permiten una separación máxima de 15 metros a una velocidad de transmisión no mayor a 9.6 kbps. Sin embargo, se realizan conexiones a distancias mayores sin problema alguno. En la *figura 1.25* se muestran los conectores de la interfase RS-232 ^[37].

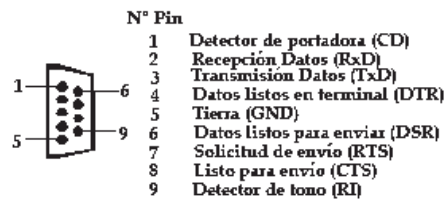


Figura 1.25.-Conectores RS-232 con sus respectivos pines

CAPITULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En una de las etapas de la fase experimental, *figura 2.1*, consistió en maquinar probetas de cobre a la que se le incorporaron artificialmente inclusiones de estaño, dichas probetas son de un tamaño de 20cm de largo y 6cm de ancho con un espesor de 1.27cm. Posteriormente fueron perforadas a una distancia, centro a centro de 3.5cm entre cada una de ellas. Esta distancia fue seleccionada así para que al momento de estar realizando la inspección de la pieza no se obtengan lecturas erróneas debido a su proximidad entre ellas ya que se manifestaría como una única inclusión de gran tamaño. Las perforaciones, taladros, de la probeta tienen los siguientes diámetros: 1.27cm, 0.3175cm, 0.47625cm, 0.635cm, y 0.79375cm. A profundidades de 50%, 30%, y 10% del espesor total de la probeta.

Para poder generar las inclusiones metálicas artificiales en nuestro caso se utilizó estaño (Sn). Para rellenar las perforaciones maquinadas en nuestras probetas de cobre posteriormente se calentó dichas probetas a una temperatura de $\approx 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ para poder fundir el estaño y así obtener un llenado uniforme en las perforaciones maquinadas a diferentes diámetros. En la *tabla 2.1* se muestran las propiedades físicas del material base (Cobre) y de las inclusiones (Estaño).

Tabla 2.1.- Propiedades físicas del cobre y del estaño.

COBRE (Material Base)	ESTAÑO (Inclusión)
$\sigma=59.7 \times 10^6 \text{ A/Vm}$	$\sigma=8.31 \times 10^6 \text{ A/Vm}$
$\kappa=399 \times 10 \text{ VA/m}^{\circ}\text{C}$	$\kappa=62.4 \times 10 \text{ VA/m}^{\circ}\text{C}$
$S=1.72 \times 10^{-6} \text{ V/}^{\circ}\text{C}$	$S=-1.73 \times 10^{-6} \text{ V/}^{\circ}\text{C}$

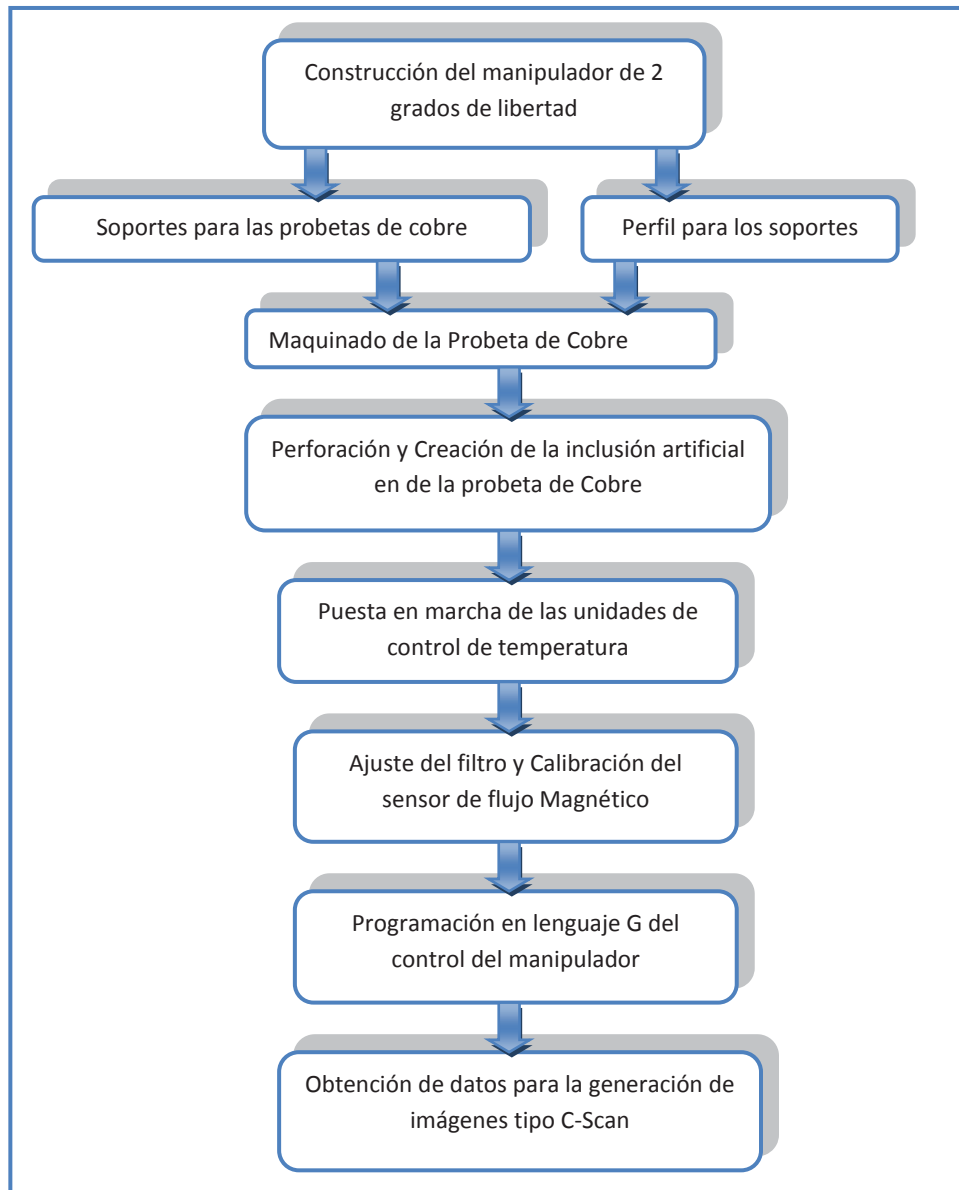


Figura 2.1.- Esquema de Metodología Experimental.

Las propiedades físicas relevantes del cobre puro y del estaño listados en la tabla anterior fueron tomados de referencias bibliográficas ^[9,12,22] con la excepción del potencial termoeléctrico absoluto del estaño a temperatura ambiente el cual fue medido por medio del instrumento termoeléctrico de contacto WALKER Scientific inc el cual se muestra en la *figura 2.2*. Dicho equipo opera ó basa su funcionamiento usando el efecto Seebeck, en el cual un voltaje es generado cuando dos materiales disímiles a diferentes temperaturas forman un circuito cerrado.



Figura 2.2.- Equipo de Termoelectricidad por Contacto.

Se encontró que el valor del estaño es afectado significativamente por la fusión y subsecuente recristalización durante la preparación de las probetas, el valor medido fue aproximadamente 20% menor que el valor de la *tabla 2.1*, el equipo termoelectrico de no contacto provee lecturas relativas solamente por lo cual fue calibrado con materiales con un potencial termoelectrico conocido tal como el cobre puro, Chromel y Alumel. Dicha grafica de calibración se muestra en la figura siguiente:

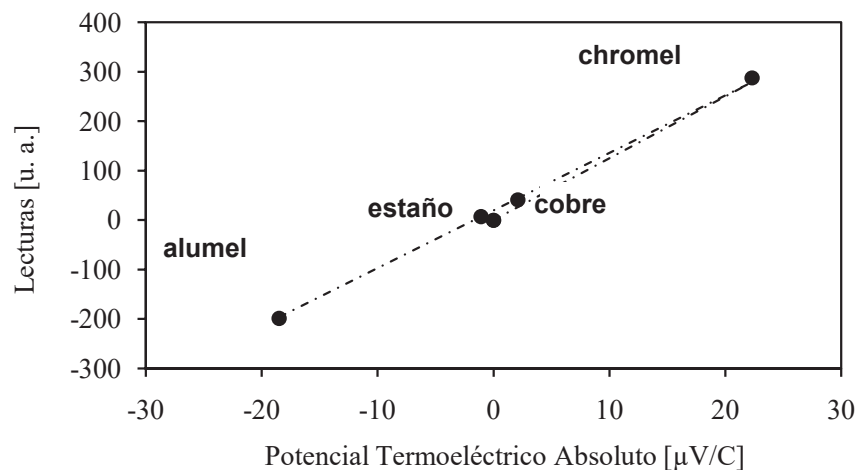


Figura 2.3.-Grafica de calibración del Estaño por medio del potencial termoelectrico.

Debido a que el acabado de la probeta después de haber colocado el estaño no quedo de forma uniforme se tuvieron que maquinar para que pudiera quedar a nivel. Se procedió a preparar las probetas maquinadas para su

inspección por medio de la técnica no destructiva de termoelectricidad de no contacto, para ello se procedió a realizar perforaciones en los extremos de cada probeta para que por estas perforaciones se pudiera hacer pasar agua destilada, la cual de un extremo debe de estar a una temperatura más elevada que la del otro extremo, para que se pueda generar un gradiente de temperatura y así generar diferentes potenciales termoeléctricos en la interfase *inclusión-metal base* para producir corrientes termoeléctricas alrededor de la inclusión. Dichas corrientes termoeléctricas nos generaran densidades de flujo magnéticos las cuales serán detectadas por medio de un magnetómetro de alta sensibilidad.

2.1 PROBETA DE COBRE CON INCLUSIONES DE ESTAÑO

Se hicieron 16 perforaciones en cada extremo de las probetas con diámetros de 0.48 cm, tal y como se ilustra en la *figura 2.4*. Ello con el fin de generar mayores gradientes de temperatura en las probetas y así poder detectar mayores densidades de flujo magnético debido a las inclusiones cilíndricas de estaño con diferentes diámetros. El total de probetas realizadas fue de 6, de las cuales tenemos 3 con 3 inclusiones en cada una de estas probetas y las otras 3 con 4 inclusiones.



Figura 2.4.- *Probeta de cobre con inclusiones metálicas de estaño.*

La primera probeta que se examinó tiene 3 inclusiones de 1.27cm de diámetro cada una con profundidades del 10% para la primera inclusión, 30% para la segunda, y 50% para la tercera; estos porcentajes son con respecto al espesor total de la barra. La segunda probeta contiene 4 inclusiones con los siguientes diámetros (0.317cm, 0.476cm, 0.635cm, 0.7938cm) éstas con una profundidad de 10% del espesor de la barra.

2.2 UNIDADES DE CONTROL DE TEMPERATURA

El líquido que se utilizó para poder generar el gradiente de temperatura fue agua destilada. Dicha agua fue calentada por nuestra unidad Thermo NesLab EX7 y por otro lado la unidad Thermo Neslab RTE 7, *figura 2.5*, sirvió como refrigerante. Estas unidades son de temperatura programable, y tienen un flujo de salida de 5 litros por minuto. Las temperaturas que se utilizaron para obtener nuestro gradiente fueron de: $+5^{\circ}\text{C}$ para la unidad refrigerante y de $+65^{\circ}\text{C}$ para nuestra unidad calefactora.

Con estas temperaturas en teoría se tendría un gradiente de temperatura de $(65-5)/20\text{cm} = 3.0^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.



Figura 2.5.- Unidades de control de temperatura.

Haciendo uso de un termopar tipo K se tomaron lecturas de temperatura en ambos extremos de cada una de las probetas obteniendo las temperaturas reales, para el extremo caliente fue de $+57^{\circ}\text{C}$ y para el extremo frío se tuvo una temperatura de $+7^{\circ}\text{C}$, obteniendo un gradiente de temperatura de $(57^{\circ}\text{C}-7^{\circ}\text{C})/20\text{cm} = 2.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

2.3 SOPORTE PARA PROBETA

Se construyeron dos soportes para montar las probetas ha ser inspeccionadas por medio de la técnica no destructiva de termoelectricidad, en los cuales se colocó una conexión de tipo macho para añadirle una manguera por medio de la cual se obtuvo un flujo de agua caliente en un extremo de la probeta y de agua fría en el otro extremo, todo esto con la finalidad de obtener un gradiente de temperatura constante a lo largo de la barra de cobre. Como se puede observar en la *figura 2.6* se tiene las dimensiones del soporte de la probeta de cobre con inclusiones de estaño:

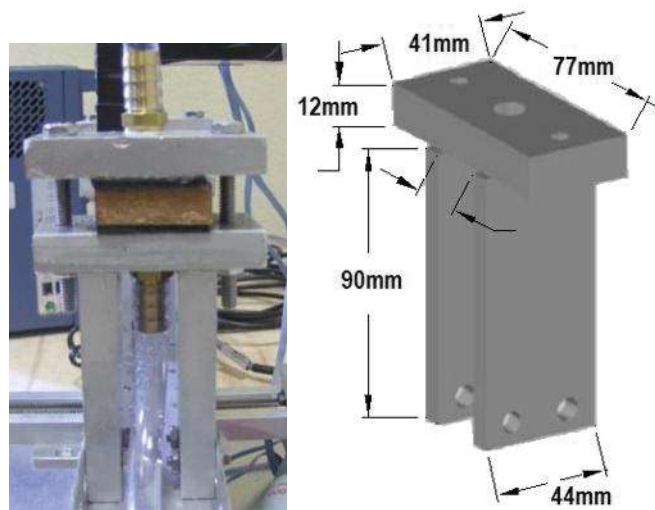


Figura 2.6.- *Pieza de soporte para la Probeta de cobre.*

Estos soportes fueron realizados a partir de una placa de aluminio de 1.27cm de espesor, y se les realizaron dos perforaciones para poder colocarle tornillos de acero inoxidable y poder sujetar la probeta para evitar alguna fuga de agua destilada en el momento que comience a funcionar los intercambiadores de calor.

El material que se utilizó para el ensamble de nuestros soportes para las probetas fue aluminio, ya que esta prueba requiere de materiales no magnéticos ya que este tipo de material podría interferir con las lecturas del sensor y dar resultados erróneos.

2.4 PERFIL PARA SUJETAR LA PROBETA

Para sujetar los soportes mencionados anteriormente se construyó un perfil tipo “U”, este perfil es de aluminio, tiene 46cm de largo por 5cm de ancho, perforaciones a los costados a cada 1.6cm. Dándonos la opción de poder montar probetas de tamaño de 9cm, 13cm, 21cm, 28cm, y 34cm de largo.

Para sujetar las probetas, se le realizaron perforaciones en las bases de los soportes para colocarle 4 tornillos de 1.905cm en cada soporte, como se muestra en la *figura 2.7*.

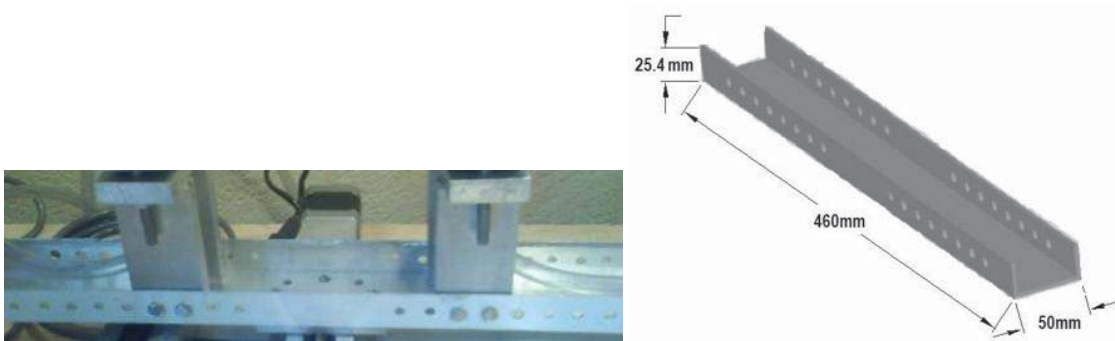


Figura 2.7.- Perfil para sujetar los soportes de la probeta.

Para separar de mejor manera las señales magnéticas de origen termoeléctrico de artefactos potencialmente dañinos a nuestros experimentos se adoptaron una serie de medidas. Primeramente se utilizó un acoplamiento AC con un filtro pasa altas de bajas frecuencias a 0.01Hz para alcanzar una alta sensibilidad e las mediciones termoeléctricas, se tuvo que utilizar materiales no magnéticos en la construcción del equipo experimental tales como: tornillos de bronce, soportes de aluminio, etc. Ello con el fin de eliminar campos magnéticos generados por materiales magnéticos los cuales afectarían de manera significativa las mediciones de los campos magnéticos generados por las inclusiones de estaño.

2.5 FILTRO PARA SEÑALES DEL MAGNETÓMETRO

La mayoría de la interferencia magnética de corriente alterna ocurre a una frecuencia de 60Hz estas señales fueron efectivamente eliminadas por un filtro pasa bajas (6 polos de 20Hz de frecuencia). Estos métodos basados en el espectro de frecuencias de señales magnéticas dañinas no pueden ser aplicados para reducir señales extrañas en el rango de frecuencia en el cual las señales termoelectricas son detectadas, entre 0.01Hz y 20Hz. En este rango se pueden separar la señal magnética deseada de señales de ruido no deseadas basadas en su dependencia espacial en vez de temporal. El equipo utilizado para llevar a cabo el corte de las frecuencias no deseadas se muestra en la *figura 2.8*.

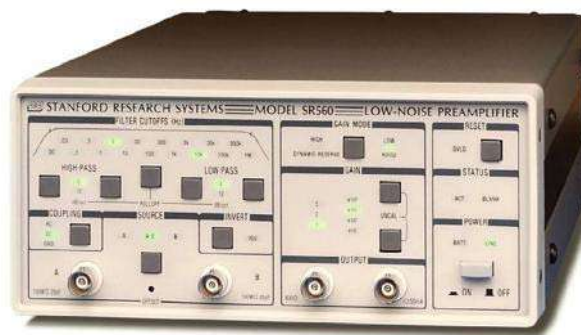


Figura 2.8.- Filtro (Pasa Bajas, Altas, Banda) y acondicionador de la señal.

El equipo Stanford Research Systems Low Noise Preamplifier Modelo SR560, utilizado para filtrar la señal obtenida del experimento de termoelectricidad de no contacto cuenta con características muy particulares como son:

- Ajuste para la determinación del tipo de filtro (Pasa bajas, Pasa banda, Pasa altas).
- Determinación de la ganancia del filtro (1, 10, 20, 50, 100).
- Selección de la frecuencia de corte para el filtro, ya sea pasa Bajas, Altas o Banda.
- Ajuste para el acoplamiento de la señal como lo puede ser AC, CD, GND.
- Así como el canal de salida de la señal A, B, A+B.

2.6 CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Para el realizar el ensamble de los motores que se encargan del movimiento del manipulador en los dos ejes, fue necesario fijarlos a una placa de aluminio de 45cm de largo por 30 cm de ancho y 1.27cm de espesor la cual a su vez esta fijada a una mesa de madera por 6 tornillos de acero inoxidable de 5.08cm de largo.

Los motores utilizados para el manipulador fueron dos motores de pasos marca VEXA modelo PK264-03A-P1, los cuales tienen una resolución de $1/8^\circ$ por paso o lo que es 0.005 mm por paso si a distancia se refiere. Cuentan con una distancia máxima de 38cm de largo para el motor que realiza el movimiento en el eje X y de 28cm para el motor que se desplaza en el eje Y, *figura 2.9*.

Como se mencionó anteriormente los materiales magnéticos afectaran de manera importante las mediciones de los campos magnético débiles producidos por un gradiente de temperatura generado en las probetas de cobre con inclusiones de estaño por lo cual se utilizarón husillos de cobre para el movimiento del soporte de las probetas de cobre.



Figura 2.9.-Manipulador de dos grados de libertad.

Para llevar a cabo la detección de las diferentes densidades de flujo producidas por las corrientes termoeléctricas generadas alrededor de los diferentes diámetros de inclusiones de estaño se utilizo un magnetómetro. El sensor de flujo magnético que se utilizo fue un fluxgate Bartington modelo Mag-03IE, el cual es un sensor de campo magnético de tres ejes, este sensor tiene una

cubierta cilíndrica de alúmina, un rango de operación de temperaturas que van de -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$, y una sensibilidad de $\pm 70\mu\text{T}$, *figura 2.10*, el cual es conectado a una fuente de poder Mag- 03PSU (Power Supply Unit) que lo energiza con un voltaje de $\pm 9\text{ V}$, como este es un sensor de tres ejes para nuestro experimento solamente se utilizó uno para realizar la adquisición de los datos de los campos magnéticos generados en las inclusiones.



Figura 2.10.- Sensor de campo magnético (Fluxgate Bartington).

Las señales magnéticas que han de ser detectadas son generadas en la interfase inclusión-metal base para ello el magnetómetro utilizado tiene una alta sensibilidad de $10\mu\text{T/V}$ con dicha sensibilidad es posible detectar densidades de flujo magnético del orden de los 20nT en nuestro caso se utilizó una distancia sensor-superficie de la probeta de 1mm de distancia, cabe mencionar que estas distancias sensor-superficie del material tienen una correlación directa con las densidades de flujo magnético producidas por defectos superficiales y sub superficiales en los materiales.

2.7 PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DEL MANIPULADOR EN LENGUAJE G

En la *figura 2.11* se muestra el código del programa escrito para el control del manipulador de dos grados de libertad, en él se puede observar todas las partes que lo componen como lo son: la selección del puerto serie (com1, com2), la parte que se encarga del envío de los datos hacia el puerto seleccionado, la lectura de los datos enviados hacia el puerto por parte del control del manipulador.

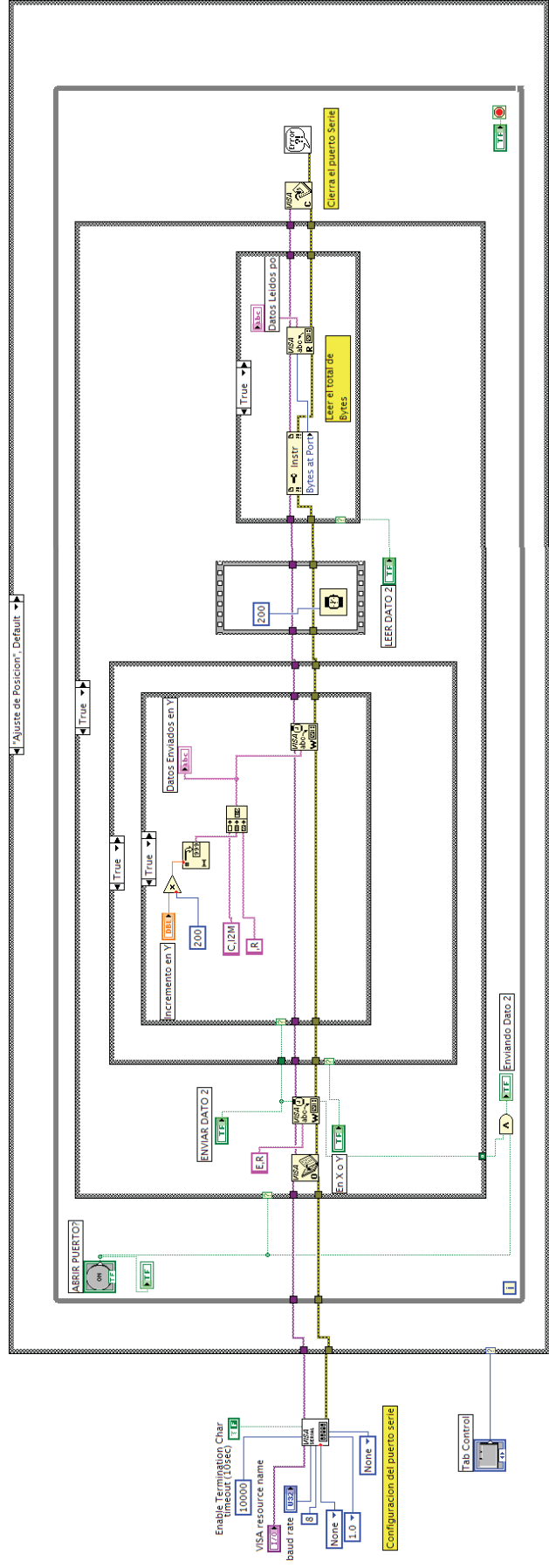


Figura 2.11.-Codigo de programación en lenguaje G (LabVIEW)

El programa utilizado para hacer el barrido de la pieza consta de una interfaz grafica realizada en lenguaje de programación G (LabVIEW). Cuenta con tres pestañas combinadas para su funcionamiento.

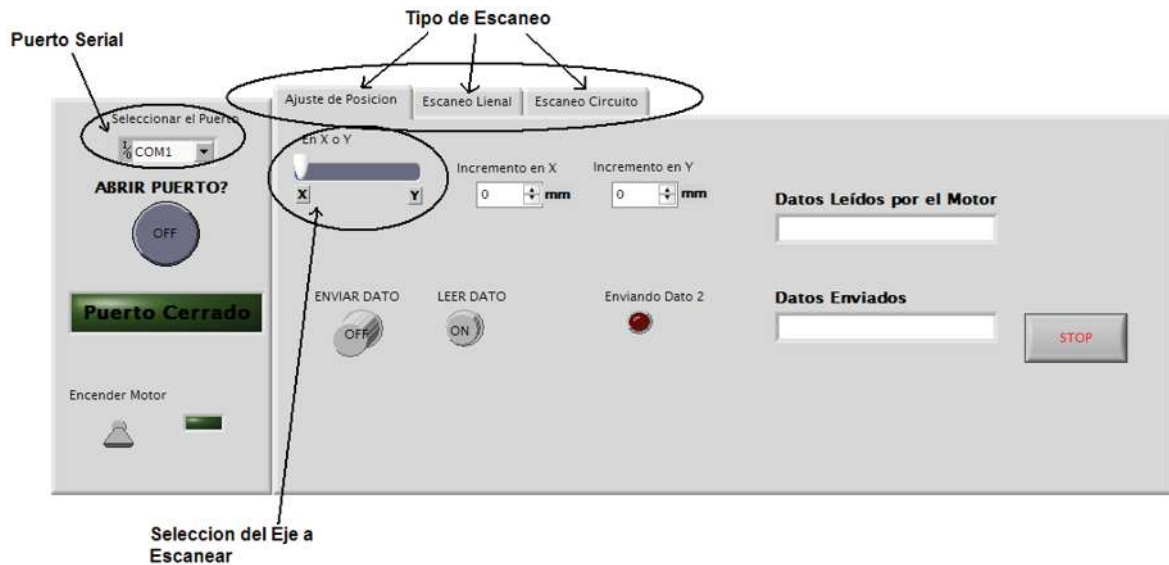


Figura 2.12.-Panel principal para escaneo de la pieza.

La primera pestaña (Ajuste de Posición) nos permite como su nombre lo indica ajustar el movimiento de los motores, de tal forma que éstos sean independientes uno del otro y así colocar la probeta de cobre con inclusiones en el lugar que viene a ser el “Origen” para comenzar nuestro barrido, la selección que determina en que eje coordinado se va a realizar el desplazamiento se hace mediante un interruptor, se puede aumentar ó disminuir el tamaño del paso en las coordenadas del eje X así como en las del eje Y, esto va a depender del tamaño de la probeta de cobre que se desee explorar. Para poder transmitir esta información hacia los motores se debe de entablar la comunicación con el puerto serie para después realizar la transmisión y recepción de los datos, cada 200 pasos del motor equivale a 1mm en desplazamiento lineal.

Para la transmisión de los datos, se encuentra el interruptor “Enviar datos” este se encarga de transmitir los valores anteriormente establecidos hacia los motores.

Una vez determinado el punto de inicio de la pieza se procedería a la realización de un barrido para explorar la probeta de cobre, esto se hace seleccionando alguna de las pestañas, en las cuales se tiene la facilidad de elegir el tipo de barrido que se desea realizar y éste puede hacerse en forma lineal o en forma de un circuito.

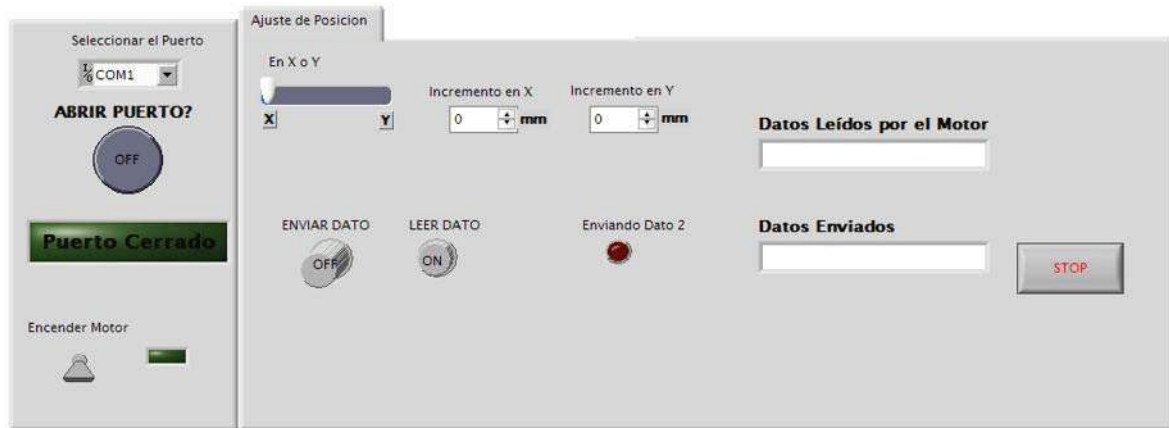


Figura 2.13.-Panel principal para realizar Barrido (Ajuste de posición).

En el caso de que se haya seleccionado el barrido en forma lineal debemos de ajustar el tamaño del paso en cada uno de los ejes coordenados que se quiera hacer la exploración colocando el numero de pasos teniendo en cuenta que 200 pasos es el equivalente a 1mm, también ajustamos el número de repeticiones que se realizaran en dicho eje el numero máximo que maneja el equipo para realizar esta operación es de 65,555 veces y posteriormente se procede al envío de la información de la misma manera como se menciono anteriormente.



Figura 2.14.-Panel principal para realizar Barrido (Escaneo lineal).

La otra opción de barrido con la que se cuenta es en forma de un circuito como el que se muestra en la *figura 2.15*. Como se pudo observar este circuito es realizado para una probeta de forma cuadrada o rectangular, en este circuito es necesaria la determinación del tamaño del paso, al igual que el número total de pasos que se van a realizar por cada parte de la cual se compone el barrido de la probeta, otra característica importante son el número de repeticiones que va a realizar el barrido de la probeta y la parte final de este panel es lo referente al envío de la información hacia los motores en el cual utilizamos el puerto serie para realizarlo



Figura 2.15.- Esquema de Barrido (Circuito).

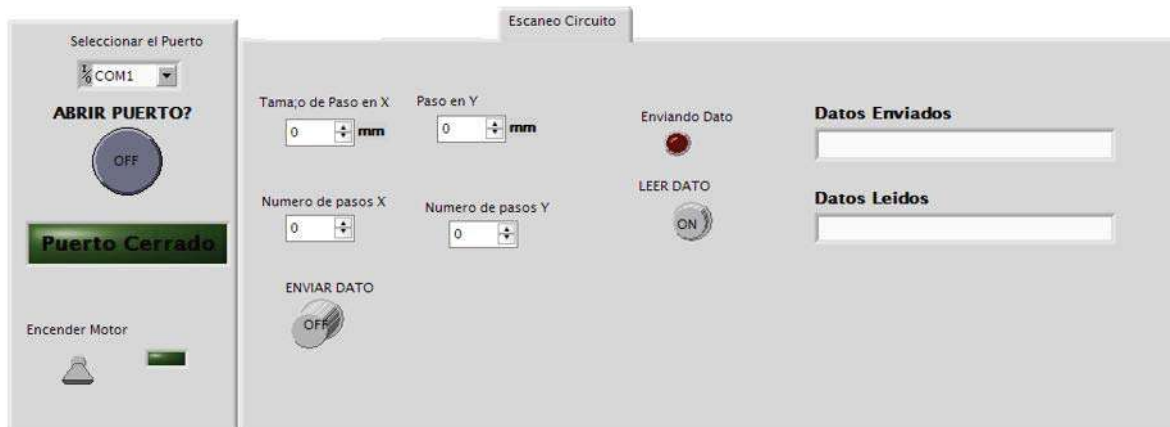


Figura 2.16.-Panel principal para realizar Barrido (Escaneo Circuito).

Cuando ya se tiene bien establecido que tipo de barrido se va a llevar a cabo, la información que se obtiene del magnetómetro al realizar este barrido es transmitida hacia un filtro para el mejoramiento de la señal y posteriormente hacia el osciloscopio. En el osciloscopio se muestran las señales correspondientes a las

lecturas del transductor al realizar la inspección. Estos datos, son datos obtenidos de forma analógica y mediante el uso del osciloscopio se realiza la conversión de los datos de forma analógica a forma digital. El osciloscopio, Lecroy modelo WAVE surfer 434, de 350MHz tiene como frecuencia máxima de muestreo, precisión de 5ps (picosegundos) en escala horizontal y 10 μ V (micro volts) en escala vertical. Los datos de las inclusiones son procesados posteriormente en el paquete de software comercial LabVIEW, por medio de este programa generamos imágenes de tipo C-Scan en las cuales pueden ser observados una representación grafica a base de colores los campos magnéticos formados por las corrientes termoelectricas generadas alrededor de las inclusiones.

Se tomaron datos de dos probetas de cobre con inclusiones de estaño, una de las probetas tiene inclusiones de diferente tamaño; la primera probeta con tres inclusiones de 1.27cm de diámetro las cuales se encuentran a diferente profundidad (10%, 30%, 50%), la segunda probeta cuenta con cuatro inclusiones con las siguientes medidas: 0.79cm, 0.64cm, 0.48cm, y 0.32cm todas las inclusiones de la segunda probeta tienen una profundidad de 10%. Una vez montada la probeta en su respectivo soporte se procedió al ajuste de los intercambiadores de calor colocándolos en +65°C y +5°C respectivamente, para lograr la generación del gradiente de temperatura como se explico anteriormente. Después se procedió a colocar la probeta en el punto de origen para poder realizar la exploración de la misma esto se hace utilizando el programa escrito en lenguaje G (LabVIEW). Una vez colocada la pieza se procede a la exploración utilizando un barrido en torno a un circuito como se muestra en la *figura 2.14*, la distancia entre el magnetómetro y la superficie de nuestra probeta es de 1mm. Cada una de las lecturas tomadas en cada inclusión se realizó utilizando una ganancia diferente, por medio del equipo Stanford Research Systems Low Noise Preamplifier, se seleccionaron las siguientes ganancias: 20, 50, y 100.



Figura 2.17.-Esquema de Barrido (lineal).

Se utilizaron dos probetas de cobre, que en conjunto se tienen siete inclusiones, tres con profundidades diferentes (10%, 30%, 50%) y mismo diámetro (1.27cm), las otras cuatro con diámetros diferentes y con una profundidad igual. En total para cada inclusión analizada se tomaron lecturas utilizando las tres ganancias mencionadas anteriormente resultando un total de 21 muestras. La señal obtenida por el magnetómetro fue mejorada y filtrada con un equipo Stanford Research Systems Low Noise Preamplifier en el cual también se lleva a cabo el ajuste de la ganancia. Una vez obtenidas estas señales se visualizan en el osciloscopio y además al mismo tiempo se lleva a cabo la digitalización de los datos. Con los datos obtenidos del barrido se procede a su análisis utilizando el paquete LabVIEW, en este paquete es posible obtener las imágenes de tipo C-Scan. La conversión de los datos de forma análoga a digital (A/D) es llevada a cabo con el osciloscopio, como se mencionó anteriormente, obteniendo un total de 20,002 muestras. Estas son las muestras totales de cada barrido y se realiza un total de 12 barridos por cada inclusión inspeccionada.

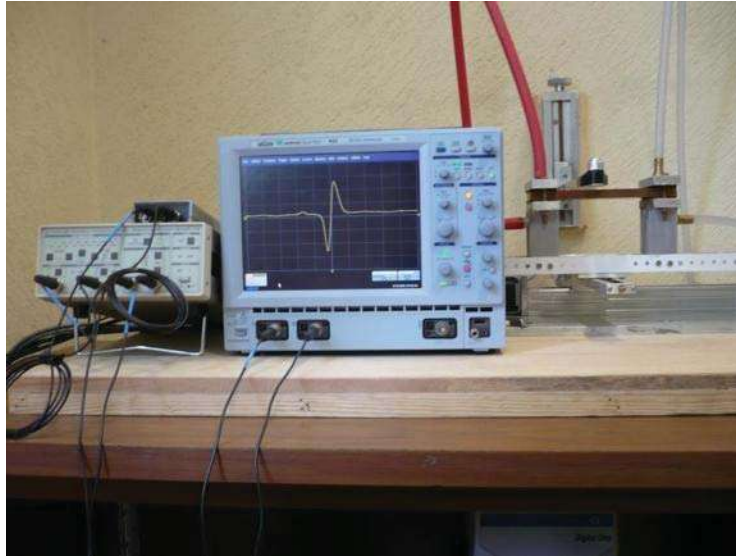


Figura 2.18.-Equipo de Termoelectricidad de no Contacto.

En la mayoría de los métodos de ensayos no destructivos utilizando el método de termoelectricidad de no contacto está limitado por el ruido del material coherente temporalmente, el cual puede ser fácilmente eliminado realizando un promedio de la señal obtenida, las principales fuentes de tales señales adversas en la técnica no destructiva de termoelectricidad son los parámetros macro estructurales tale como el endurecimiento, el trabajado en frío, la anisotropía, textura, esfuerzo residuales, etc. mientras que parámetros micro estructurales tales como el tamaño de grano son menos importantes debido a la carencia de resolución. Para ilustrar tales efectos adversos de la señal producida por los parámetros macro estructurales mencionados anteriormente se presenta la *figura 2.18*.

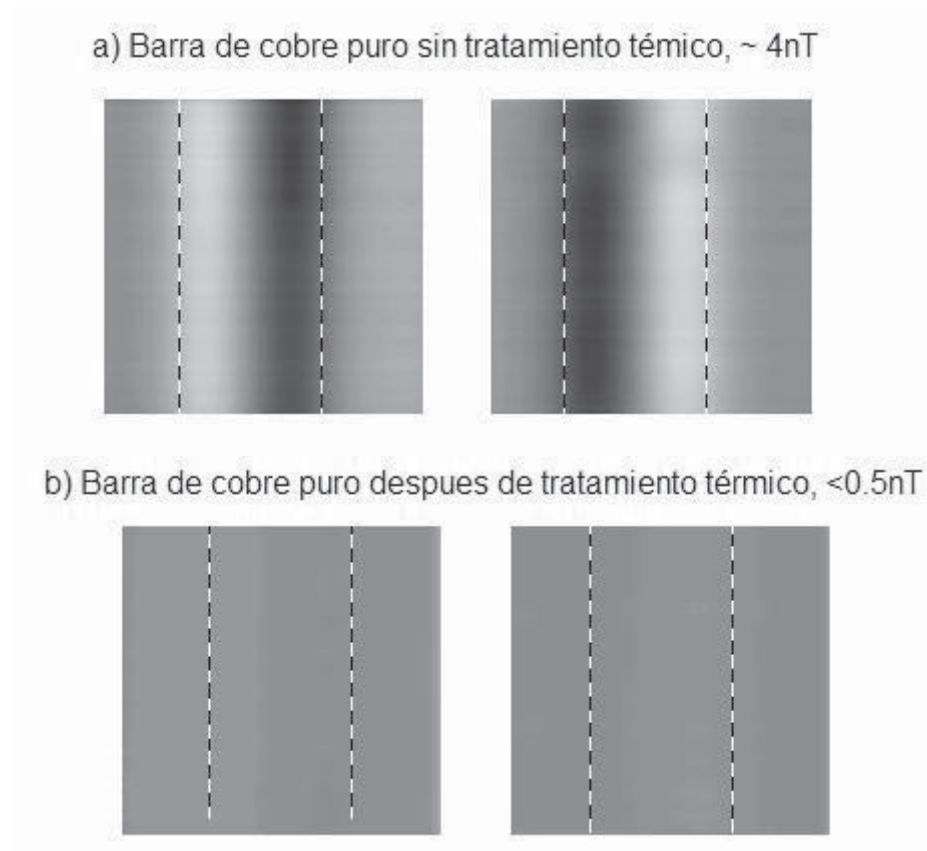


Figura 2.19.-Efectos producidos por los parámetros macroestructurales.

En esta figura se muestran las señales magnéticas de una barra de cobre puro con diferentes direcciones de gradientes de temperatura. Como se puede observar existe una marca significativa de la línea base a través de la longitud de la barra la cual no cambia de signo cuando la barra es girada pero si lo hace cuando la dirección del gradiente térmico es cambiada. La densidad de flujo magnético de esta línea de base es aproximadamente 4nT . Estos efectos son mucho menores en una barra la cual es tratada térmicamente por medio de un recocido a 30 min a 700°C en un horno al vacío lo cual da como resultado una densidad de flujo de aproximadamente 0.5nT esto es debido a que el tratamiento térmico elimina los parámetros macro estructurales tales como el endurecimiento, trabajo en frío que haya sufrido el material durante su proceso. En nuestro caso las barras de cobre que se utilizaron como material base fueron tratadas térmicamente recociéndolas a una temperatura de 700°C por 30 minutos esto con la finalidad de que se eliminaran los efectos de los parámetros macro estructurales

del material, tal y como se explicó anteriormente, estos generan densidades de flujo magnéticos de alrededor de 6nT lo cual podría interferir con la detección de las inclusiones de estaño.

Para darnos una idea del rango de densidades de flujo magnético que se esperan obtener durante el escaneo de las inclusiones cilíndricas de estaño en una barra de cobre se presenta el siguiente ejemplo: Con un diámetro de inclusión de 9.73mm se obtiene una densidad de flujo magnético de 95nT utilizando un gradiente de temperatura de 0.7°C/cm, en nuestro caso el gradiente de temperatura es de 2.5°C/cm por lo cual se esperan obtener mayores densidades de flujo magnético al inspeccionar una inclusión con el mismo diámetro.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez colocada nuestra probeta sobre los soportes y haciendo uso de las unidades de control de temperatura para generar el gradiente de éste, la temperatura seleccionada en la unidad calefactora fue de 65°C y la temperatura de la unidad refrigerante fue de 5°C. Con estas temperaturas se obtuvo un gradiente de temperatura a través de la barra de cobre, la cual tiene 20cm de largo, con lo cual se obtuvo:

$$\frac{65^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}}{20\text{cm}} = 3^{\circ}\text{C}/\text{cm} \quad (3.1)$$

Este es el valor del gradiente de temperatura obtenido con las lecturas desplegadas en los intercambiadores de calor antes mencionados, ahora para obtener las temperaturas reales en la barra de cobre con inclusiones de estaño se utilizo un termopar tipo K colocándolo en los extremos de la probeta y haciendo uso de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se tomaron las temperaturas. Se hizo fluir agua caliente a 57°C, lectura en el extremo izquierdo, *figura 3.1(circulo rojo)* mientras que en el otro extremo se hizo fluir agua fría a una temperatura de 7°C *figura 3.1(circulo azul)* de la probeta, con lo que se generó un gradiente de temperatura real de:

$$\frac{57^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C}}{20\text{cm}} = 2^{\circ}\text{C}/\text{cm} \quad (3.2)$$

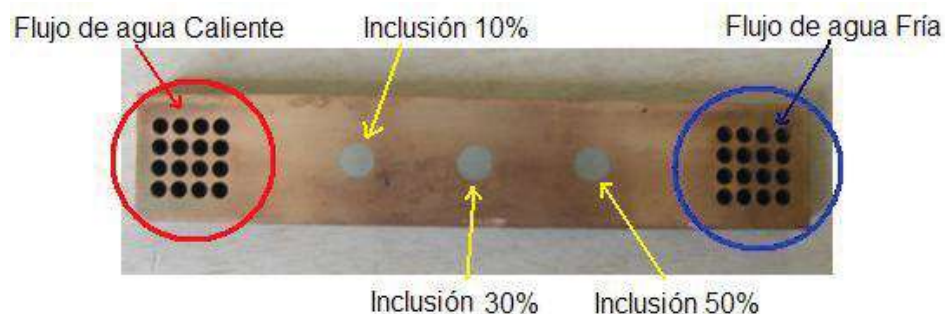


Figura 3.1.-Probeta de cobre con inclusiones de estaño.

Se podrá notar que se perdió $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ en comparación con el gradiente de temperatura calculado por las temperaturas programadas en los intercambiadores de calor a través de la barra de cobre. Es importante mencionar que es de suma importancia dicho parámetro ya que está directamente afectado por las corrientes termoeléctricas producidas en la interface inclusión- material base. Como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$H_0 = -a\nabla T \sigma (S' - S) \Gamma \quad (3.3)$$

Donde: H_0 es la densidad de flujo magnético

a es el diámetro de la inclusión

∇T es el gradiente de temperatura

σ es la conductividad eléctrica del material base

S' y S potencial termoeléctrico de la inclusión y material base respectivamente.

Γ es el parámetro de contraste donde:

$$\Gamma_c = \frac{2}{\left(1 + \frac{\sigma}{\sigma'}\right) \left(1 + \frac{\kappa'}{\kappa}\right)} \quad (3.4)$$

Como ejemplo para ver el efecto del gradiente de temperatura se realizaron cálculos de la densidad de flujo magnético producido por las inclusiones debido al fenómeno termoeléctrico generado por el potencial electroquímico por lo cual a continuación se presentan resultados del flujo magnético a diferentes gradientes de temperatura desde 20°K a 100°K en una inclusión de estaño de 1.27mm de diámetro a una profundidad de 50% del espesor total de la barra de cobre.

Variables y Constantes			Nuestros Datos				
S_{SR}	0.00000245	0.00000245	0.00000245	0.00000245	0.00000245	0.00000245	V/k
Sigma (σ)	59700000	59700000	59700000	59700000	59700000	59700000	A/Vm
Kappa (κ)	399	399	399	399	399	399	W/mk
Sigma' (σ')	8310000	8310000	8310000	8310000	8310000	8310000	A/Vm
Kappa' (κ')	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4	W/mk
Gamma (Γ)	0.2113263	0.2113263	0.2113263	0.2113263	0.2113263	0.2113263	
Diametro	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	m
Radio (a)	0.00635	0.00635	0.00635	0.00635	0.00635	0.00635	m
ΔT	20	40	50	60	80	100	$^{\circ}K$
Longitud (L)	0.205	0.205	0.205	0.205	0.205	0.205	m
∇T	97.56097561	195.1219512	243.902439	292.6829268	390.2439024	487.804878	$^{\circ}K/m$
H_0	19.1488997	38.2977994	47.87224928	57.4466991	76.5955989	95.7444986	A/m
B_0	24316.0631	48632.1263	60790.15782	72948.1894	97264.2525	121580.316	nT

Tabla 3. 1.-Valores Obtenidos para H_0 y B_0 .

Como se puede observar en la tabla anterior el gradiente de temperatura juega un importante rol en la densidad de flujo magnético resultante como por ejemplo con un gradiente de temperatura de $20^{\circ}K$ se obtiene un $B_0 = 19.1488A/m$ comparado con un gradiente de temperatura de $40^{\circ}K$ se obtiene un $B_0 = 38.2977A/m$. como se puede observar existe una diferencia de $19.1489A/m$ en la densidad de flujo magnético producida por las corrientes termoeléctricas generadas en la interface estaño-cobre por lo que se procedió a realizar una medición más detallada y controlada de las temperaturas producidas en los extremos de la barra de cobre (figura 3.2) como se puede observar en la grafica siguiente:

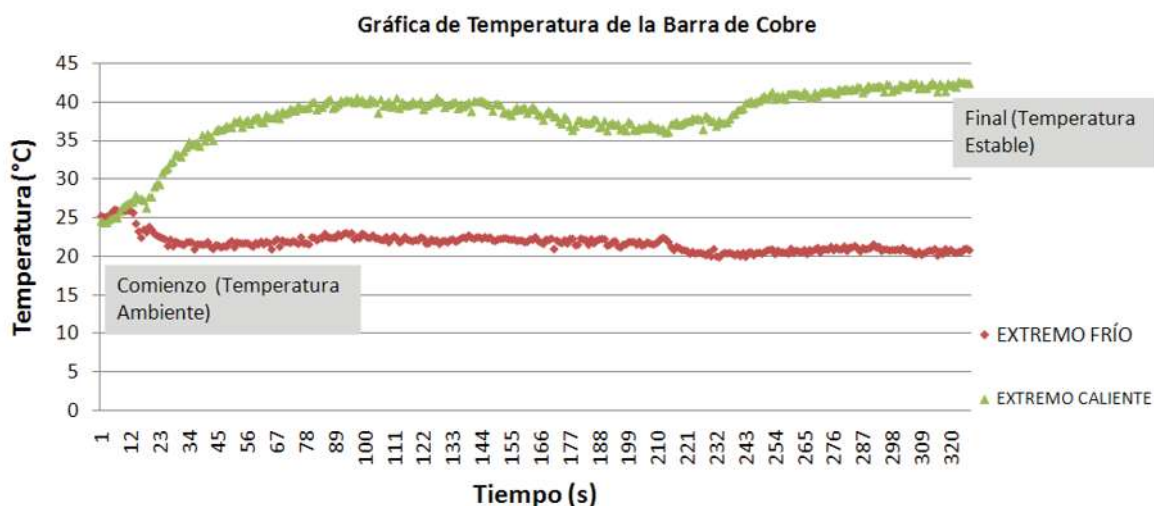


Figura 3.2.-Temperaturas alcanzadas hasta su estabilización.

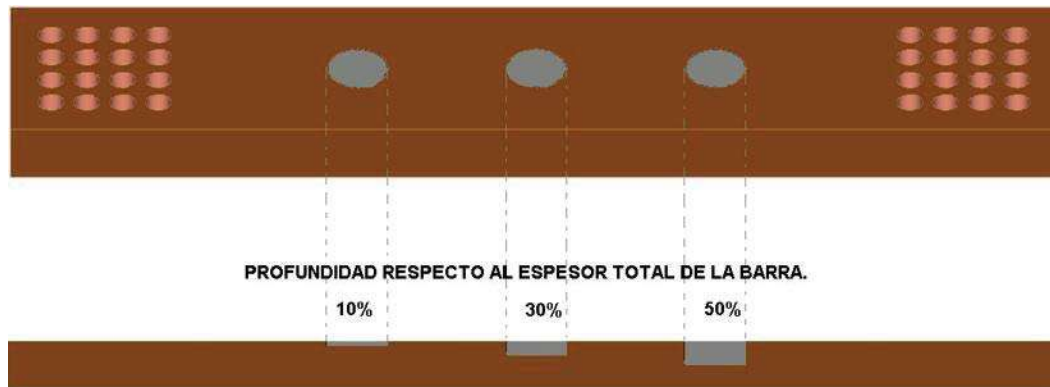


Figura 3.3.- Barra de cobre con inclusiones artificiales de estaño.

Se tomaron varias lecturas de la temperatura tanto en el extremo caliente como en el extremo frío colocando un termopar en dichas posiciones realizando las lecturas por medio de un programa escrito en LabVIEW, y como se puede observar se tomaron las lecturas desde la temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura máxima de calentamiento de 43°C y una temperatura mínima de enfriamiento de 19°C en cada uno de los extremos de la barra de cobre. Con esto se calculó de manera más eficiente el gradiente de temperatura térmica a través del material base, resultando un gradiente de $1.2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Para llegar a esto se aplicó la formula 3.1, para inclusiones con un diámetro de 1.27mm y una profundidad de 50% del espesor de la probeta de cobre y con los datos de la *tabla 3.1*. Con los valores del potencial termoeléctrico, conductividad eléctrica y térmica del estaño y del cobre se obtuvieron los siguientes valores para $H_0=22.9786\text{A}/\text{m}$ dando como resultado un B_0 (Densidad de Flujo Magnético) de 29179.2758nT .

Se procedió a hacer un barrido a una inclusión de 1.27mm diámetro, con una profundidad de 10%, con un gradiente térmico de $2.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ a una distancia muestra-sensor de 1mm . Se usaron los siguientes parámetros del preamplificador de baja frecuencia: una ganancia de 20, un filtro pasa altas con frecuencia de corte de 0.03, acoplamiento DC y bajo ruido, el canal utilizado fue el A (Un sensor) velocidad de escaneo de X, con lo cual se obtuvo una densidad de flujo magnético de $14,065\text{ nT}$, con la formula siguiente:

$$B_{\text{exp}} = \frac{(\text{Voltaje})(\text{Sensibilidad})}{\text{Ganancia}} \quad (3.5)$$

Donde el Voltaje es la distancia pico-pico de la señal bipolar producida por las corrientes termoeléctricas, una de ellas con un circuito positivo en la interface inclusión-material base y la otra con un circuito negativo en la interface material-base

Esto se puede observar de mejor manera en la *figura 3.4*.

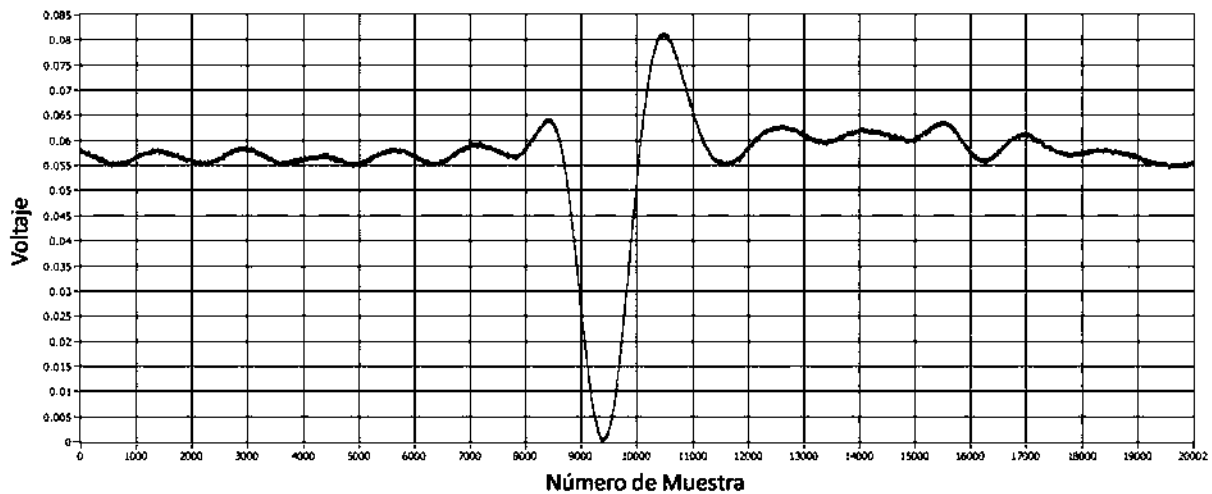


Figura 3.4.- Señal bipolar producida por corrientes termoeléctricas alrededor de una inclusión de estaño de 1.27mm de diámetro y profundidad de 10%

Con respecto a la variable de la sensibilidad, ésta se tomó del magnetómetro (Fluxgate Bartington Instruments Mag -03) la cual es de $100\mu\text{T/V}$ y la ganancia como se mencionó anteriormente fue de 20, cabe mencionar que la caracterización total de una señal bipolar consiste de dos parámetros; el voltaje pico-pico y la mitad de ancho de la señal. Aquí a mayor tamaño de la inclusión mayor el voltaje de pico a pico de la señal producida por dichas inclusiones y a menor tamaño de las inclusiones existe un mayor ensanchamiento de la señal ^[9].

Se realizaron cálculos para ganancias de 50 y 100 las cuales se muestran en las figuras siguientes:

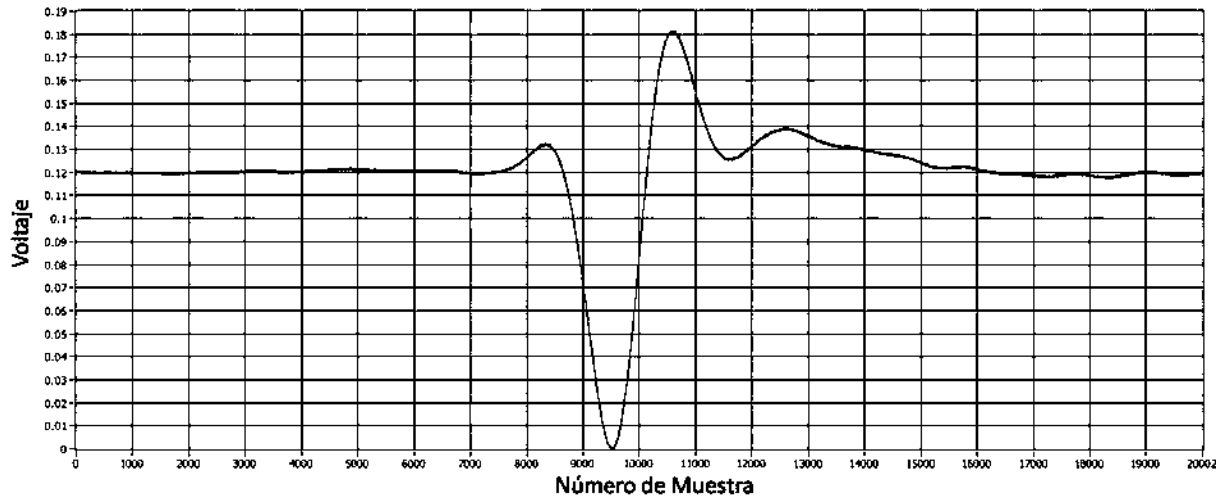


Figura 3.5.- Señal bipolar producida por corrientes termoeléctricas alrededor de una inclusión de estaño de 1.27mm de diámetro y profundidad de 30% para una ganancia de 50.

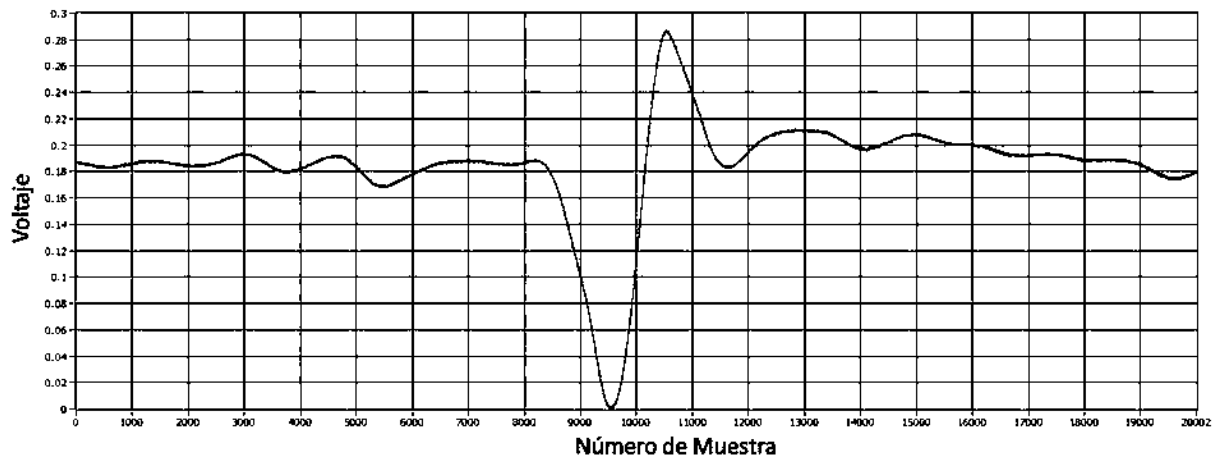


Figura 3. 6.- Señal bipolar producida por corrientes termoeléctricas alrededor de una inclusión de estaño de 1.27mm de diámetro y profundidad de 50% para una ganancia de 100.

Como se puede observar en las figuras 3.5, y 3.6 a mayor ganancia se obtiene una mayor simetría en la señal obtenida, esto es muy útil e importante para realizar consideraciones cualitativas y cuantitativas de la señal producida por las corrientes termoeléctricas. Esta es uno de las principales aportaciones de nuestro trabajo experimental ya que como se verá posteriormente esto ayudara a obtener una imagen más nítida de la inclusión detectada por el magnetómetro.

Posteriormente al realizar el escaneo de nuestra inclusión metálica se obtuvieron de esta forma varias señales de tipo A-Scan como las mostradas en las figuras anteriores para poder generar una imagen de tipo C-Scan representativa de nuestra inclusión.

Cabe mencionar que el A-Scan como se demostró anteriormente es de mucha utilidad para la caracterización de defectos (Voltaje pico-pico, mitad de ancho de la señal bipolar), en este caso inclusiones por medio del fenómeno de termoelectricidad.

Sin embargo por medio del A-Scan no es posible analizar la forma y dimensión del defecto detectado, por otra parte el C-Scan (Conjunto de señales tipo A-Scan) las cuales se obtienen realizando el barrido y almacenando esta señal posteriormente al realizar otro barrido se guarda la señal de tal forma que al conjuntarlas se pueda generar un imagen tipo C-Scan. Comparando un A-Scan a una C-Scan esta última nos proporciona una imagen, la cual rápidamente nos da información espacial de los defectos e imperfecciones permitiendo una fácil interpretación de ellos. A continuación se muestra las imágenes C-Scan para una inclusión de estaño:

Con una ganancia de 20, distancia entre sensor y probeta de 1mm, diámetro de la inclusión de 1.27mm, profundidad de la inclusión 10% del total de la barra.

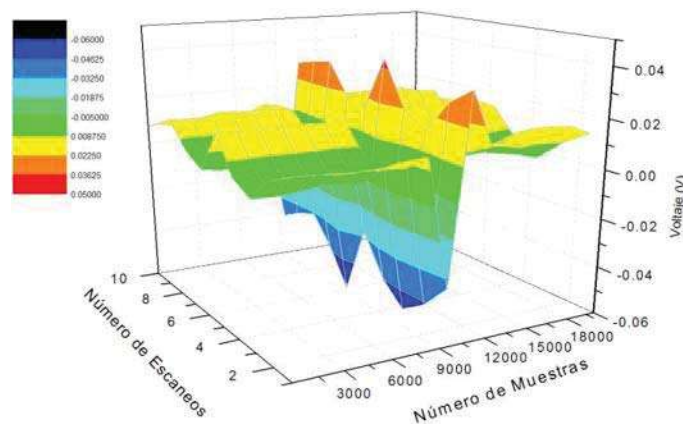


Figura 3.7.-Grafica de Señales obtenidas del escaneo de una inclusión de 1.27mm de diámetro con el 10% de profundidad.

Con una ganancia de 50 distancia entre sensor y probeta de 1mm, diámetro de la inclusión de 1.27mm, profundidad de la inclusión 30% del total de la barra

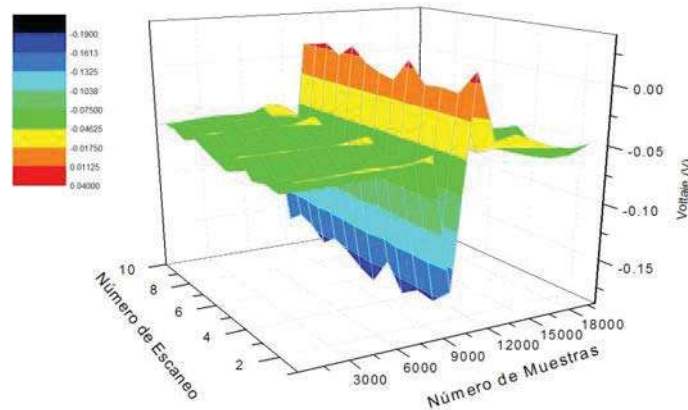


Figura 3. 8.-Grafica de Señales obtenidas del escaneo de una inclusión de 1.27mm de diámetro con el 30% de profundidad.

Con una ganancia de 100, distancia entre sensor y probeta de 1mm, diámetro de la inclusión de 1.27mm y una profundidad de la inclusión del 50% del total de la barra

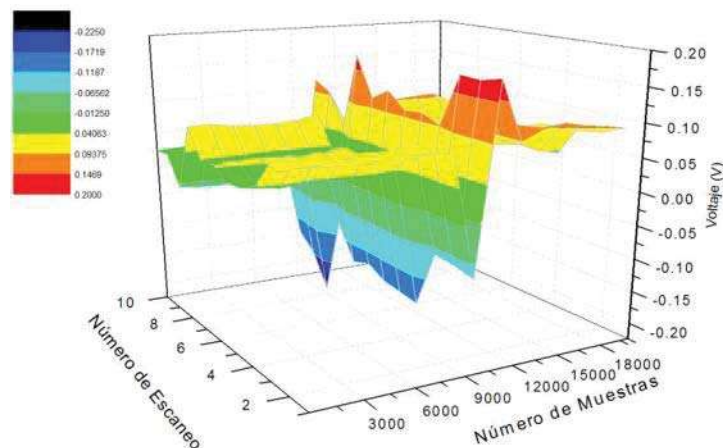
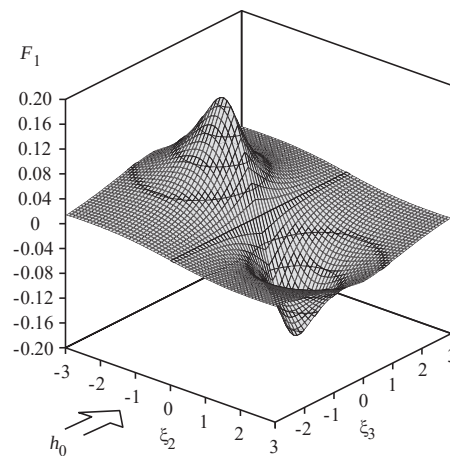
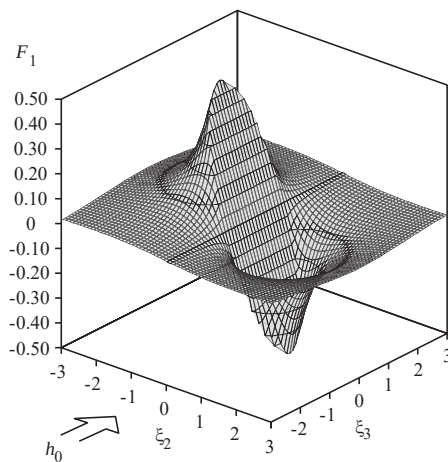


Figura 3.9.-Grafica de Señales obtenidas del escaneo de una inclusión de 1.27mm de diámetro con el 50% de profundidad.

Como se puede observar en las imágenes C-Scan a diferentes ganancias la distribución del campo magnético medido es similar en forma a las predicciones analíticas mostradas en las siguientes figuras en la cual se muestra las distribuciones del campo magnético tomadas en planos paralelos a la superficie a 4 diferentes distancias muestras-sensor (0, 0,5, 1,2) para un inclusión semiesférica con su centro en la superficie. Esto puede ser cualitativamente esperado de la *figura 1.5*, las corrientes termoeléctricas fluyen en direcciones opuestas a lo largo de dos circuitos en lados opuestos de la inclusión relativo a la dirección del flujo térmico $[h_0]$, de esta manera el campo magnético es asimétrico con respecto a esta dirección la forma característica producida por los picos positivo y negativo en la distribución del campo magnético son muy típicos en la detección termoeléctrica de no contacto de inclusiones y puede ser fácilmente explotada por el procesamiento de imágenes digital y técnicas de extracción “FFT, convolucion, transformadas de Fourier etc” para incrementar la probabilidad de detección de inclusiones. Entre mayor sea la distancia muestra-sensor, menor va a ser el pico del campo magnético y va a haber un ensanchamiento de la distribución de dicho campo ^[3].



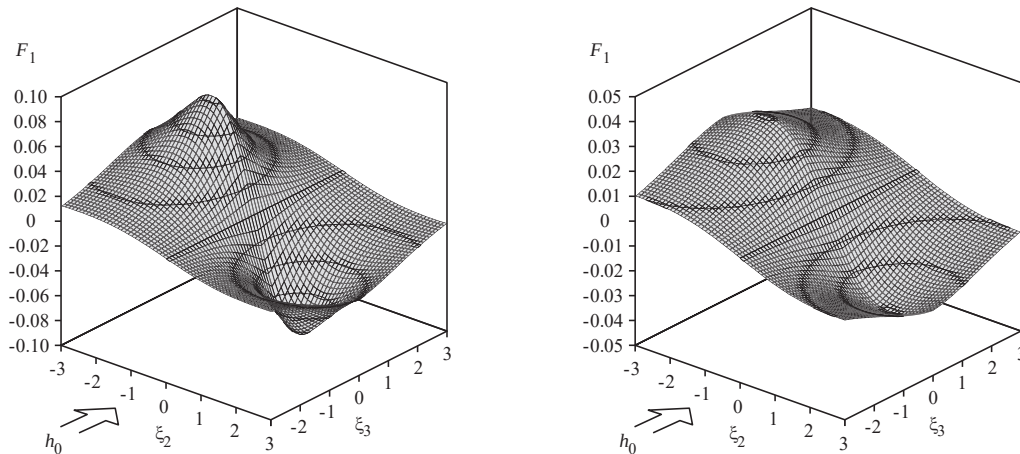


Figura 3.10.-Distribuciones del componente normal del campo magnético tomado en cuatro diferentes planos paralelos ala superficie a diferentes distancias muestra-sensor para una inclusión semiesférica con su centro en la superficie.

Como se esperaba en las figuras escaneadas a diferentes distancias muestra-sensor muestran una excelente similitud de las distribuciones de los campos magnéticos producidas por las corrientes termoelectricas, se puede observar en cada una de ellas una distribución de campo magnético bipolar en la cual dichos picos positivos (Color rojo) y negativos (Color azul) comienza a decrecer conforme la distancia muestra-sensor incrementa y se observa un ensanchamiento de dicha distribución al incrementar la distancia muestra-sensor haciendo una comparación entre los resultados analíticos y experimentales y considerando las aproximaciones crudas de un modelo teórico así como las variables involucradas en el fenómeno de termoelectricidad además de los errores experimentales asociados con las mediciones , el ruido externo, etc. La comparación resulta ser muy buena.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES:

Se puede mencionar que los resultados obtenidos para el presente trabajo concuerdan con estudios y publicaciones realizados por otras personas en relación a esta técnica de ensayos no destructivos (termoelectricidad de no contacto). Al ser esta técnica muy novedosa, hoy en día no se tiene explorado todo el potencial que ofrece ya que el equipo que se requiere suele ser muy costoso. Por medio de esta técnica puede ser posible analizar esfuerzos residuales, textura, segregaciones, inclusiones, anisotropía, en materiales no magnéticos.

Se pudo comprobar que el gradiente de temperatura obtenido fue suficiente para poder generar corrientes termoeléctricas en las inclusiones de estaño, además se lograron obtener lecturas por medio del magnetómetro Fluxgate Bartington. Se logró la obtención de imágenes tipo A-Scan así como de imágenes más representativas como lo son las C-Scan en las cuales por medio de una degradación de colores es posible a simple vista observar la representación grafica de la ubicación de las densidades de flujo magnético.

Con estos resultados se sientan las bases para trabajos futuros de aplicaciones con materiales de importancia ingenieril tales como: aleaciones de titanio y aleaciones base níquel, entre otras.

RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO:

Las siguientes son algunas sugerencias para trabajos futuros basadas en las conclusiones y problemas identificados en el desarrollo de este trabajo experimental.

- Adquisición de un sensor con más sensibilidad para poder obtener mejores datos a partir de la densidad de flujo magnético pequeña. Con esto también se podrían obtener señales más focalizadas.
- Construir un cuarto de aislamiento electromagnético para el equipo de termoelectricidad de no contacto, de esta manera se obtendrían señales más confiables, por medio de esta técnica.
- Construir una mesa con 3 grados de libertad para de esta forma realizar el desplazamiento en el eje Z de forma automática.
- Llevar a cabo pruebas con diferentes gradientes de temperatura para establecer el gradiente térmico necesario al cual se comienzan a generar las corrientes termoeléctricas.
- Cambiar el tipo de inclusión para poder observar el comportamiento y desempeño de la técnica
- Tener un mejor control en el sistema de refrigeración y calefacción y evitar así gradientes de temperatura no deseados.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

1. G.S. Nolas, J. Sharp, H. J. Goldsmid “*Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Developments*” Springer, 2001, pp. 1-5
2. S. Kasap, “*Thermoelectric effects in metals: thermocouples*”, Web Materials 2001, pp 1-11.
3. A. H. Nayfeh, H. Carreon, P.B. Nagy, “*On the exploitation of thermoelectric coupling for characterization of inclusions in metals*”, Review of progress in quantitative non destructive evaluation **20**, 2001, pp. 1686-1693.
4. E. B., Henry, Stuart, C.M., Tomasulo, W, *Nondestructive Testing Handbook*, **9**, 1995, pp 363-376.
5. C.M. Stuart, *Intern. Adv. Nondestructive Testing*, **9**, 1983, pp 177-192.
6. W. Morgner, *Mat Eval.*, **9**, 1991, 1081.
7. J. Hu, P.B. Nagy, *Appl. Phys. Lett*, **73**, 1998, 467.
8. P.B. Nagy, J. Hu, Review in Progress in QNDE, **17** D.O. Thompson and D.E. Chimenti, 1998, pp. 1573-1580.
9. H. Carreón, “*Thermoelectric detection of the magnetic field by fluxgate gradiometer on subsurface tin inclusions embedded in a copper bar*”, *NDT&E inter.*, **39**, 2006, pp 22-28.
10. J. Nye, *Physical Properties of Crystals, Their Representation by –tensors and Matrices*, Clarendon Press, 1985, pp 215-232.

11. P.B. Nagy, A.H. Nayfeh, *"On the thermoelectric magnetic field of spherical and cylindrical inclusions"*, Journal of Applied Physics, **87**, 2000, pp. 7481-7490
12. H. Carreón, P. B. Nagy, and A. H. Nayfeh, *"Noncontacting thermoelectric detection of spherical inclusions in copper by magnetic sensing"*, Review of progress in quantitative non destructive evaluation **20**, 2001, pp. 1694-1701, 2001.
13. X. KLEBER, GEMPPM, *"Surface and subsurface metallic inclusions detected using hot tip thermoelectric power measurements"*, 2006
14. F.J. Blatt, P.A. Schroeder, C.L. Greid, *"Thermoelectric power of metals"*, Plenum press, New York and London, 1976.
15. J.M. Leborgne, Ph. D. Thesis, Institut National des Sciences Appliquées Lyon, France, 1996.
16. R. Borrelly, Mem. Sci. Rev. Met., **1**, 1976, 37.
17. N. Lavaire, J. Merlin, V. Sardoy, *Materiala*, **44**, 2001, 553.
18. V. Massardier, V. Guetaz, J. Merlin, M. Soler, Mater Sci. Eng., **355**, 2003, 299.
19. V. Massardier, T. Epicier, P. Merle, Acta Materiala, **48**, 2000, 2911.
20. L. Simonet, X. Kleber, F. Fouquet, S. Sallet, *"Characterization of segregated areas in ferritic steels by thermoelectric power measurement"*, ECNDT, 2006, pp. 1-9.

- 21.Y. Tarvin, G.S. Krivoy, J.H. Hinken, J.P. Kallmeyer, "*A Thermoelectric Method to detect weak local structural changes and inclusions in metal parts*", Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, **20**, 2001, pp. 1710- 1716.
- 22.H. Carreon, P.B. Nagy, A.H. Nayfeh, "*Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper y magnetic sensing*" Journal of Applied Physics., **88**, 2000, pp. 6495-6500.
- 23.K. Maslov, V.K. Kinra, Mater Eval., **59**, 2001, pp. 1081-1084.
- 24.H. Carréon, A. Medina "*Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples*", Nondestructing Testing and Evaluation, **22**, 2007, pp. 299-311.
- 25.H. Carréon, "Thermoelectric Detection of Hard Alpha inclusion in Ti-6Al-4V by magnetic sensing", Journal of Alloys and Compounds, **427**, 2007, pp. 183-189.
- 26.H. Carreon, W.I. Faidi, A.H. Nayfeh, P.B. Nagy, NDT. E. Int., **36**, 2003, pp. 339-348.
- 27.L.J. Brasche, O. Buck, D.O. Thompson, D.E. Chimenti (Eds.), Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, **10**, 1991, pp. 1701-1706.
- 28.W.G. Jenks, S.H. Sadeghi, J.P. Winkswow, "*SQUIDS for nondestructive evaluation*", J. Phys, D: Appl. Phys., **30**, 1997, pp. 293-323.

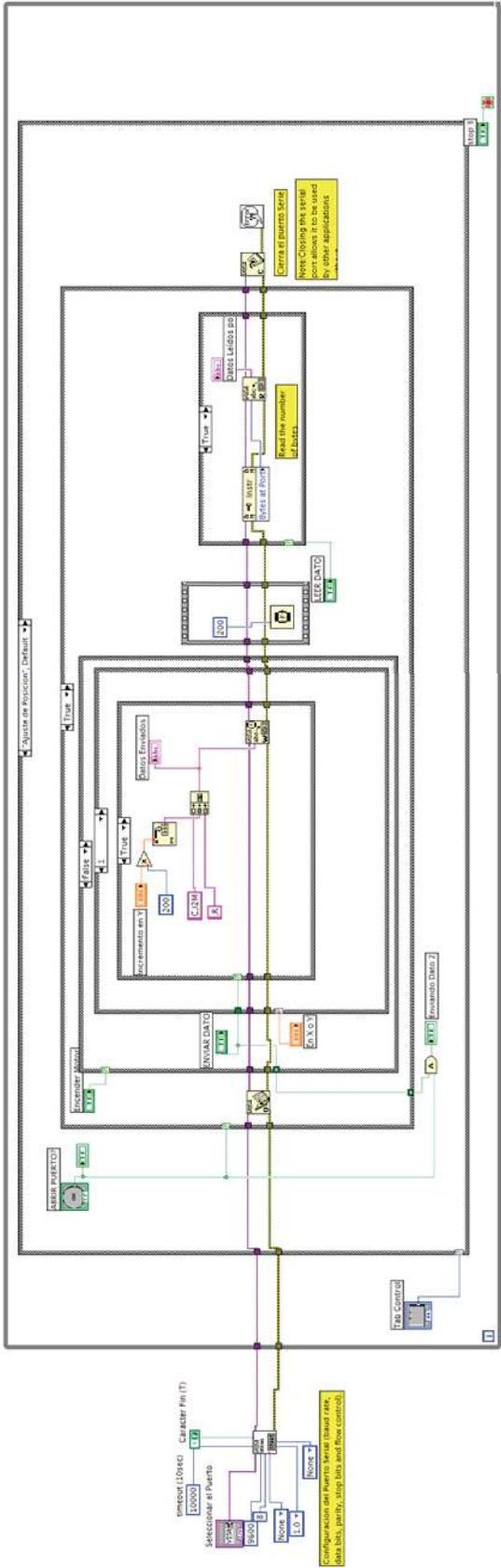
29. Adan H. Nayfeh, Hector Carreón, and Peter B. Nagy, "*Role of Anisotropy in Noncontacting Thermoelectric Materials Characterization*", **91**, 2002, pp.225-231.
30. A.C. Bruno, C.F. Barbosa, L.F. Scavarda, "*Electric current injection NDE using a SQUID magnetometer*", *Res Nondestr Eval*, **8**, 1996, pp. 165-175.
31. Mag 03_DS0013v13 datasheet, pp. 1-10.
32. Y. Sheiretov, "*Deep Penetration Magnetoquasistatic Sensors*", Tesis Doctoral: Massasuchetts Institute of Tecnology, 2001, pp.113-143.
33. Zu-Cheng Gao, R. Doncaster, "*Fluxgate Sensor Theory: Sensitivity and Phase Plane analysis*", *IEEE transactions on geosciences and remote sensing*, **6**, 1987, pp. 862-870.
34. E. Rodríguez, R. Godínez, R. Barrales, E. Vázquez, "*Sensores de campo magnético débil y su aplicación en magnetocardiografía*", *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, **26**, 2005, pp. 37-43
35. P.M. Enrique, R.D. Fernando, L.P. Lucas "*Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos*", ED. Alfa Omega, 2004, pp. 481-484.
36. J.M. Tomothy, "Electronica Industrial Moderna", Ed. Prentice Hall.
37. Compañía Editorial Tecnológica "*Curso Avanzado de Microcontroladores PIC*", Ed. CEKIT, pp. 59-63"
38. L.J. Brasche, O. Buck, D.O. Thompson, D.E. Chimenti (Eds.), *Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10**, 1991, pp. 1701-1706.

39. Stuart, C. M., in Intern. Adv. Nondestructive Testing, Vol. 9 (Gordon and Breach, Newark, 1983) pp. 177-192.
40. Nye, J. F., "*Physical Properties of Crystals, Their Representation by Tensors and matrices*", Clarendon Press, Oxford, 1985, pp. 215-232.
41. <http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>

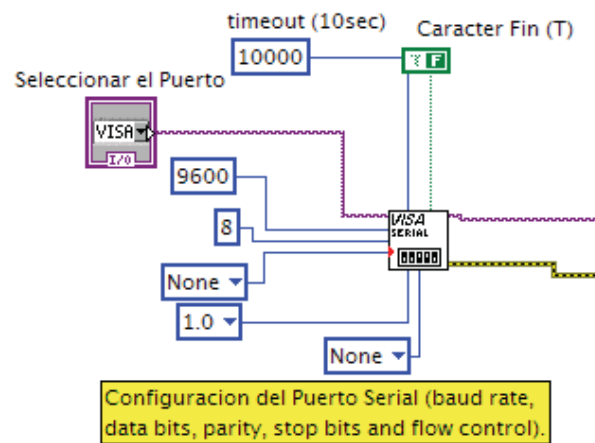
ANEXO 1

DIAGRAMAS DE PROGRAMACION EN LENGUAJE G (LabVIEW)

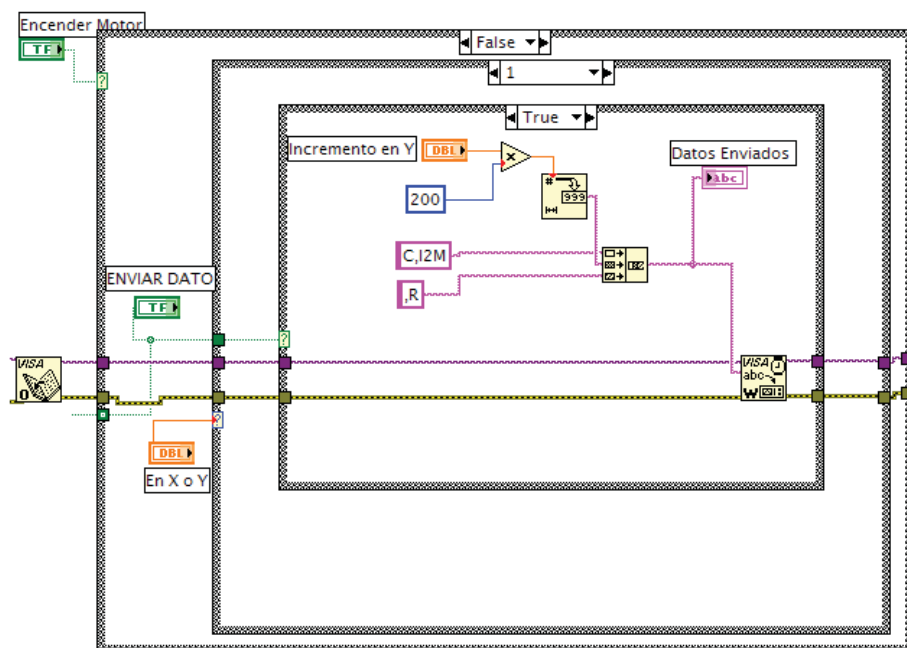
Programa para el Ajuste de posición de la probeta



Programa para la selección de la posición de arranque de la probeta para comenzar el escaneo.

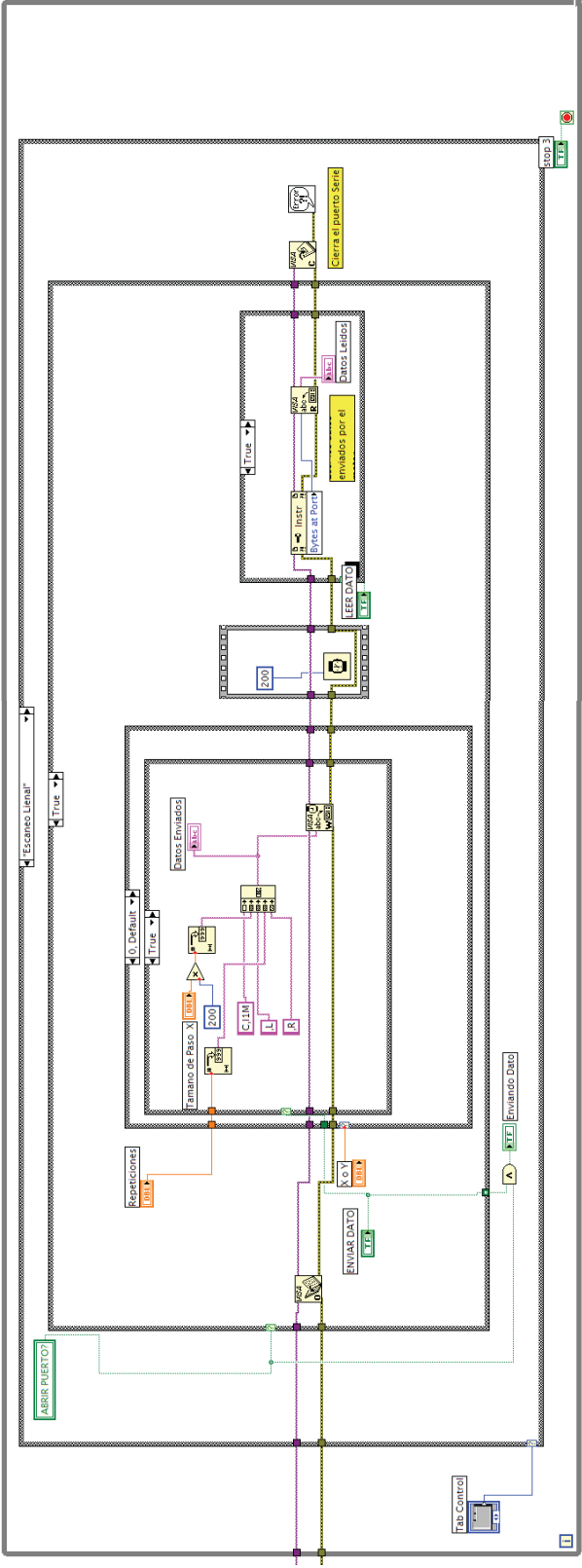


Configuración del Puerto Serial (RS232)

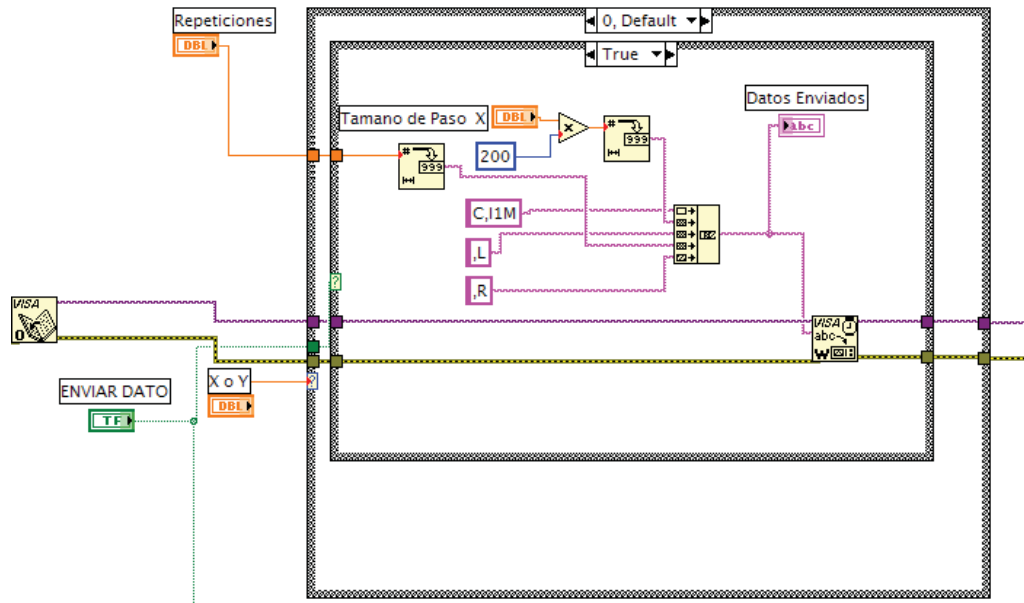


Asignación de los valores del tamaño del paso para mover el motor en eje Y
(Ajuste de Posición)

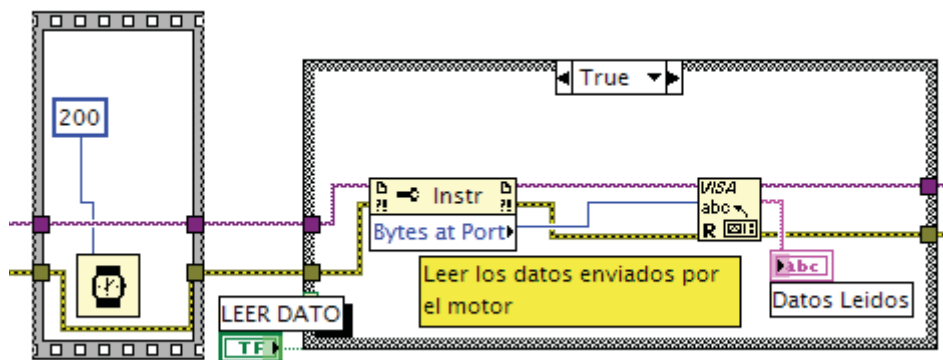
Programa para el Escaneo Lineal



Programa para realizar un escaneo en forma lineal.

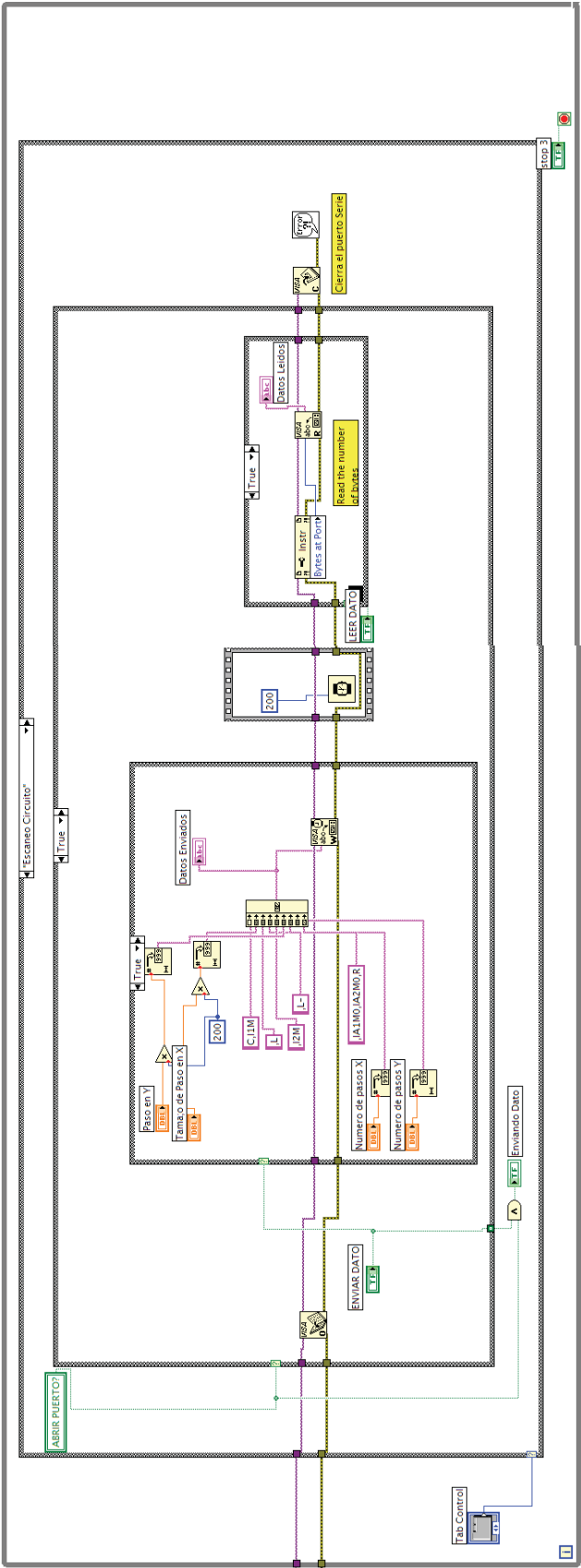


Asignación de los datos del eje a escanear y escritura del buffer para el puerto serial

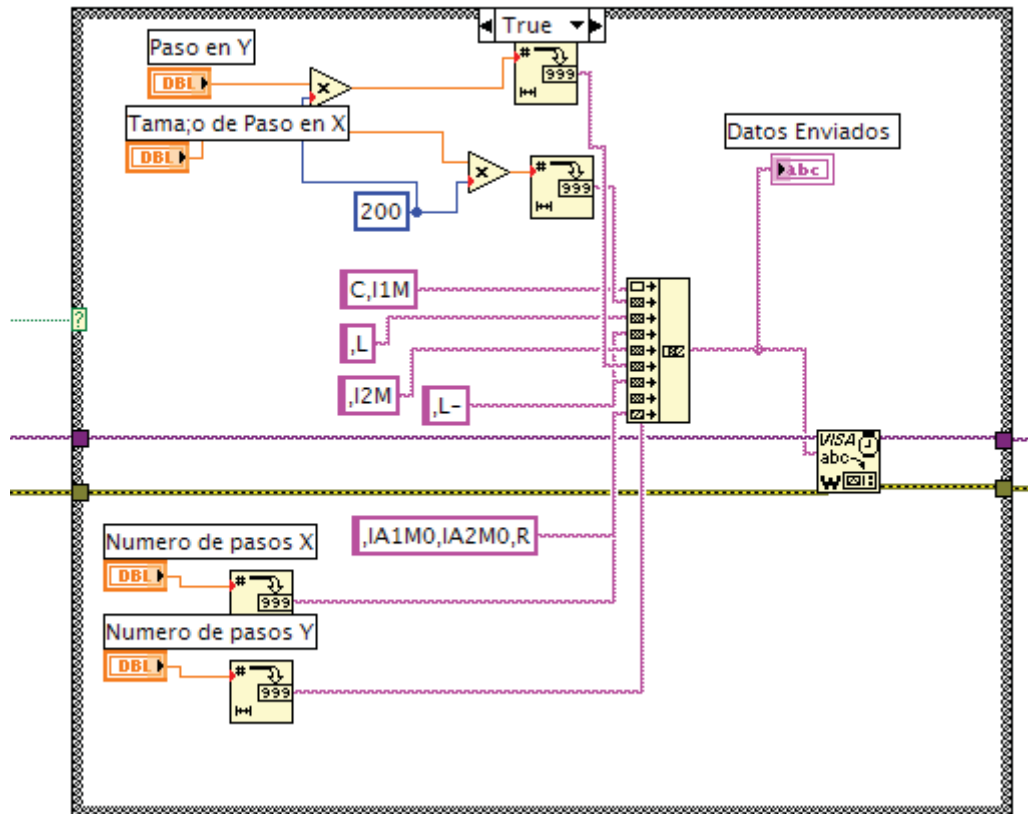


Tiempo de espera para el envío de los datos y lectura del buffer de salida del puerto serial

Programa para el escaneo realizando un circuito establecido



Programa para realizar un escaneo en forma de un circuito.



Subrutina para la asignación de datos en la parte correspondiente al programa de Escaneo en forma de un circuito defino

ANEXO 2

IMÁGENES C-SCAN DE INCLUSIONES METÁLICAS

Inclusión 1 (diámetro de 1.27mm profundidad 10%, ganancia 20)

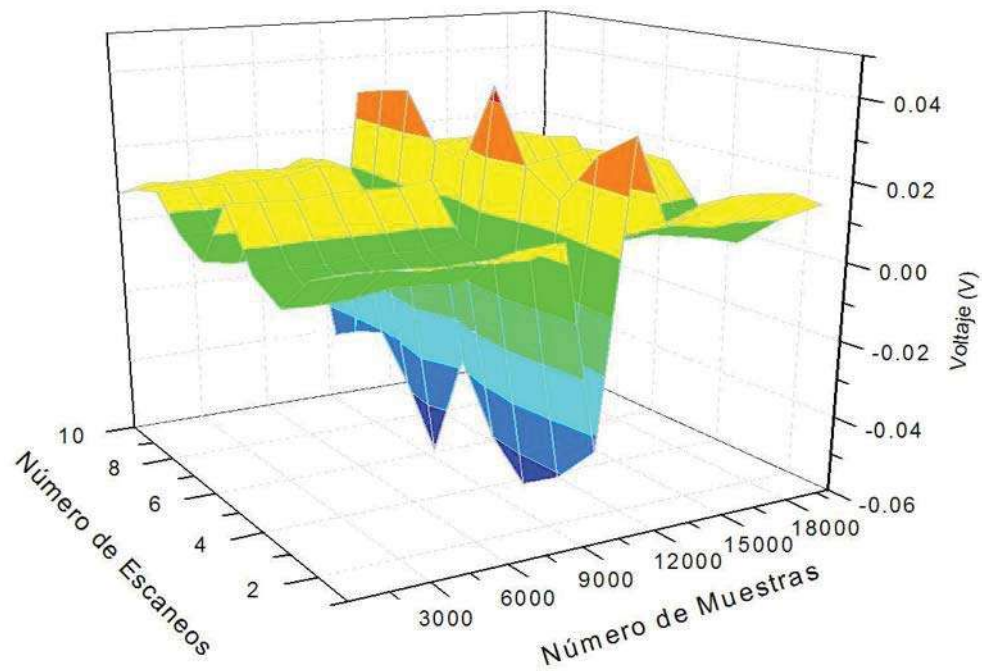


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

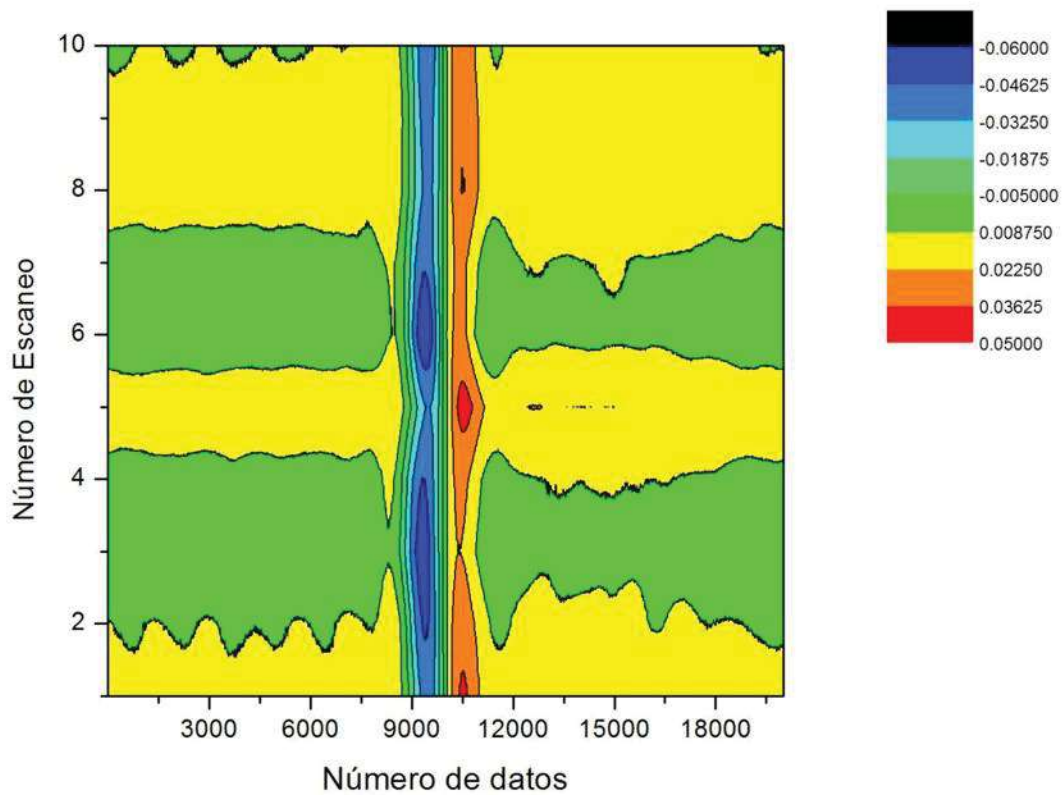


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 1.27mm profundidad 30%, ganancia 20)

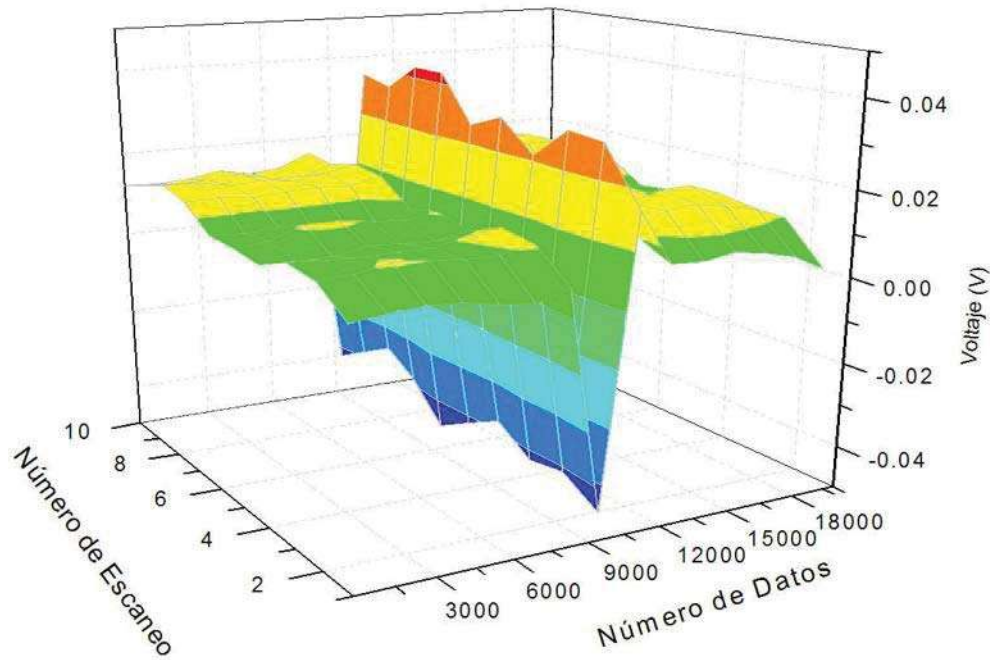


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

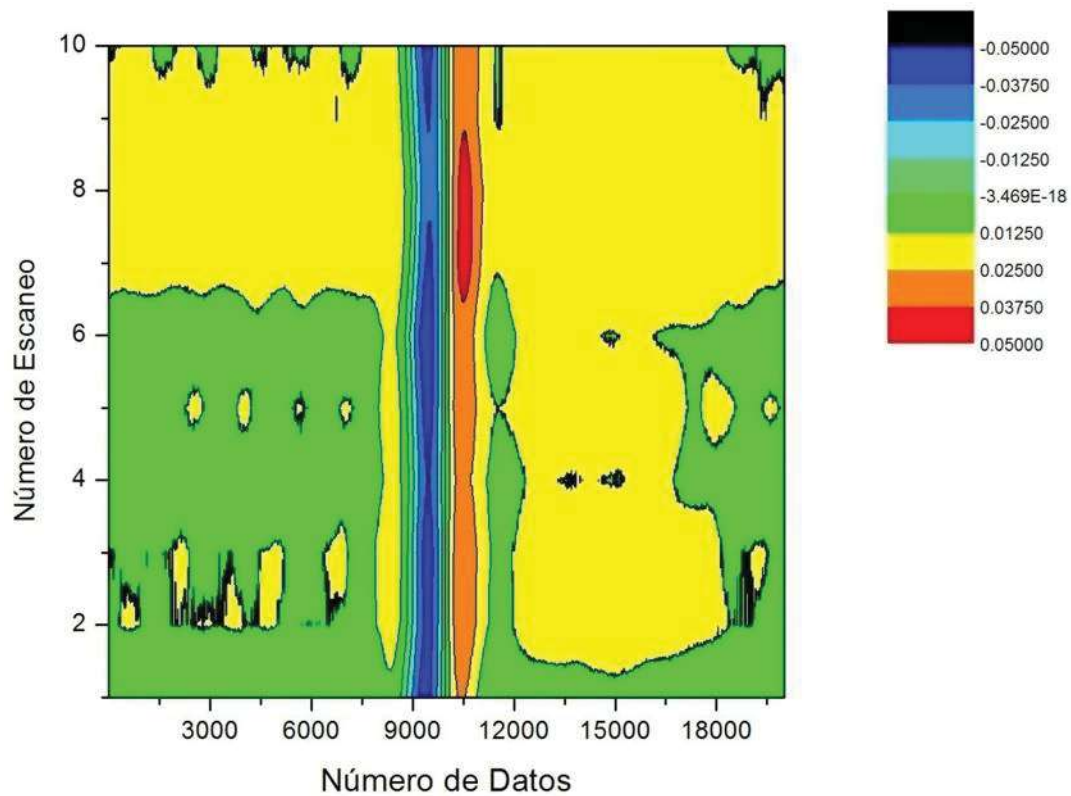


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 1.27mm profundidad 50%, ganancia 20)

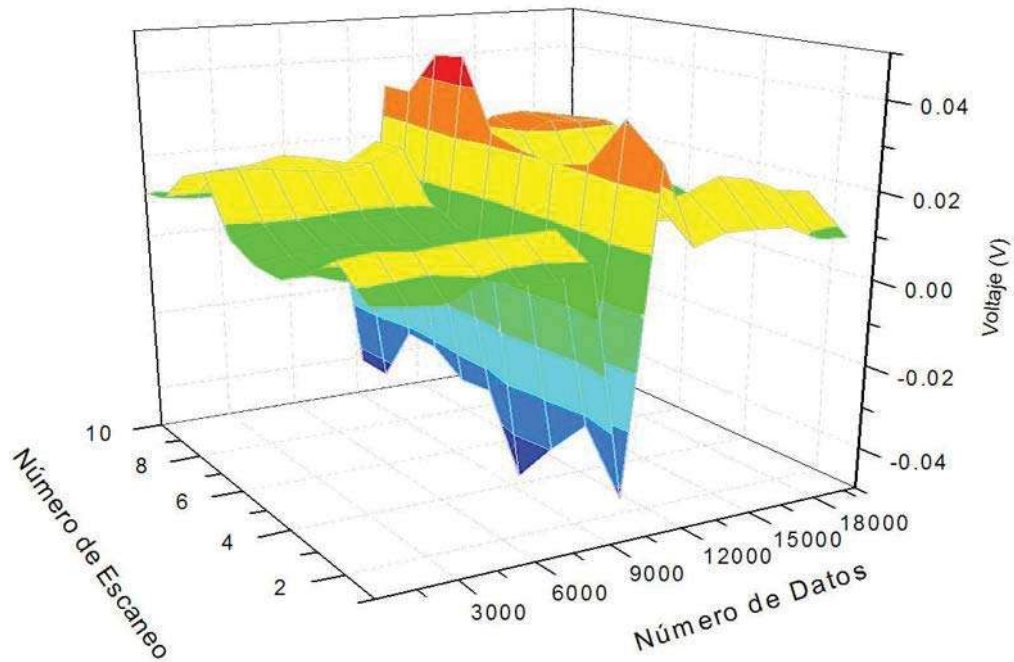


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

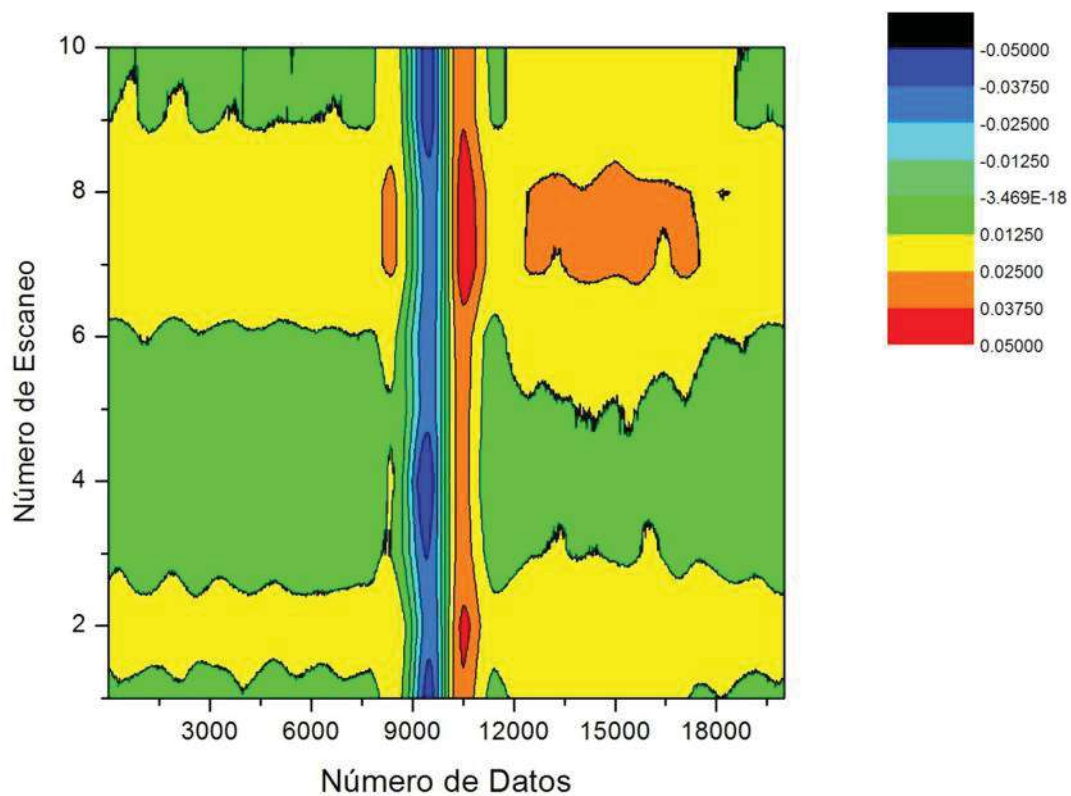


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 1 (diámetro de 1.27mm profundidad 10%, ganancia 50)

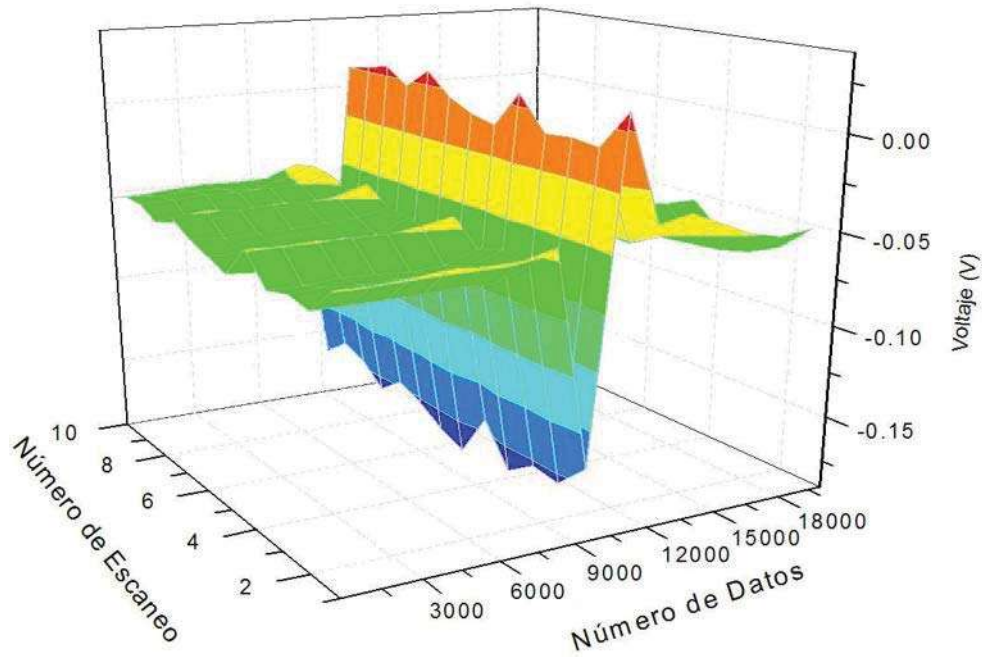


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

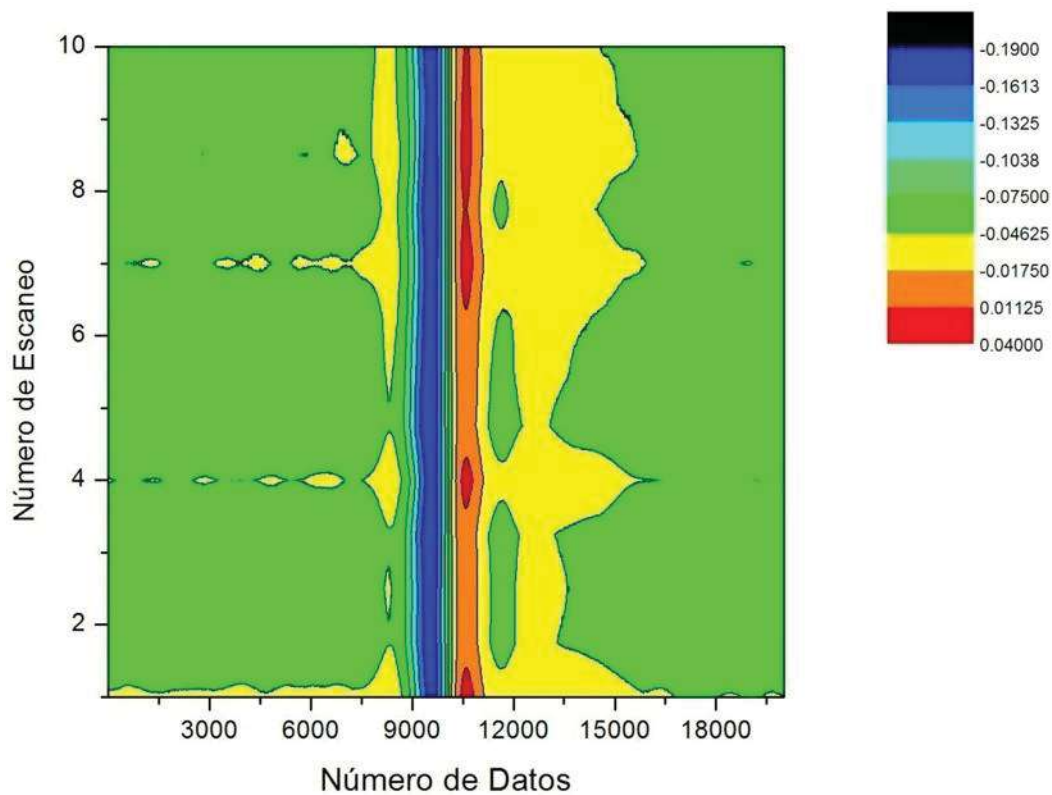


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 1.27mm profundidad 30%, ganancia 50)

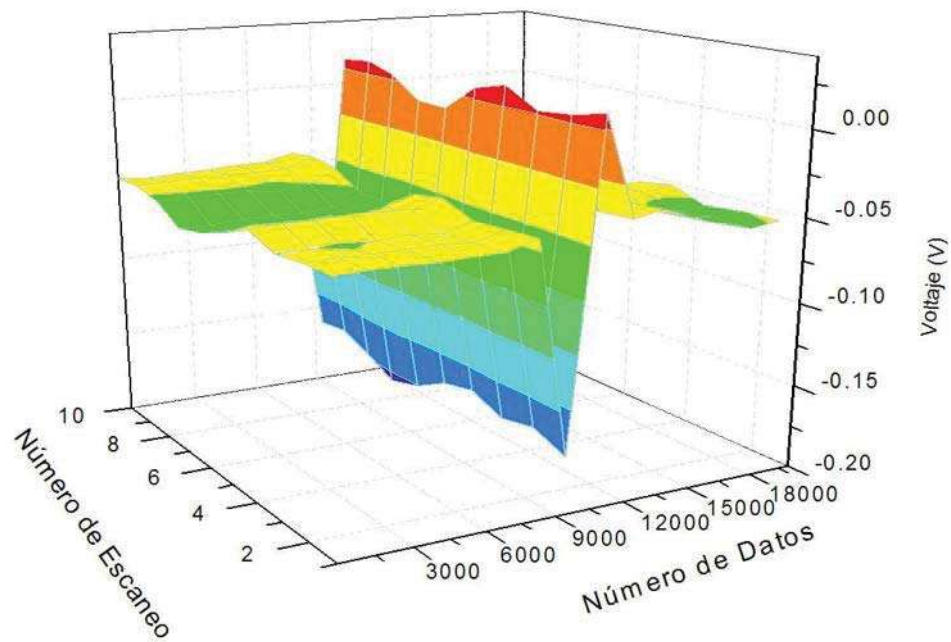


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

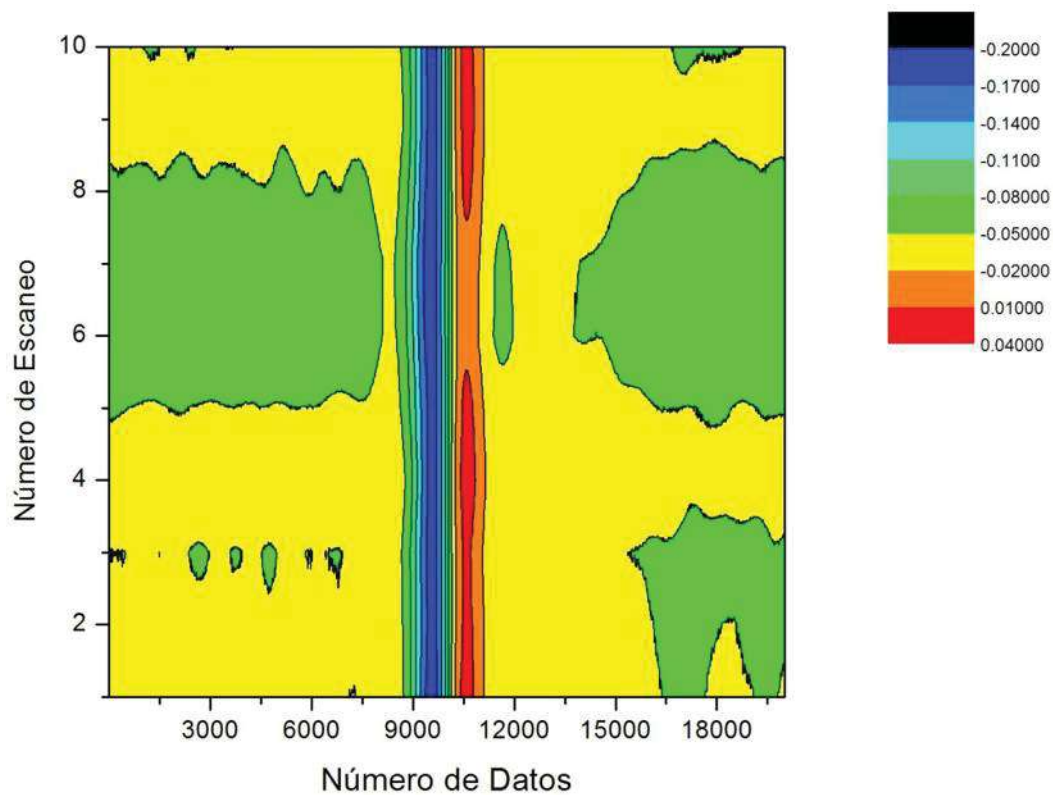


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 1.27mm profundidad 50%, ganancia 50)

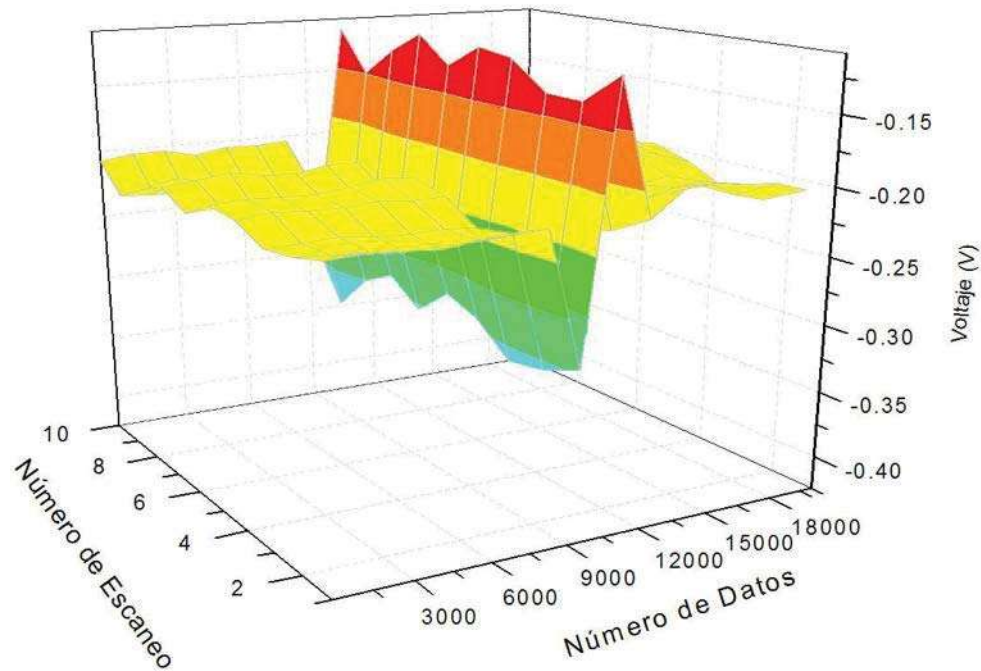


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

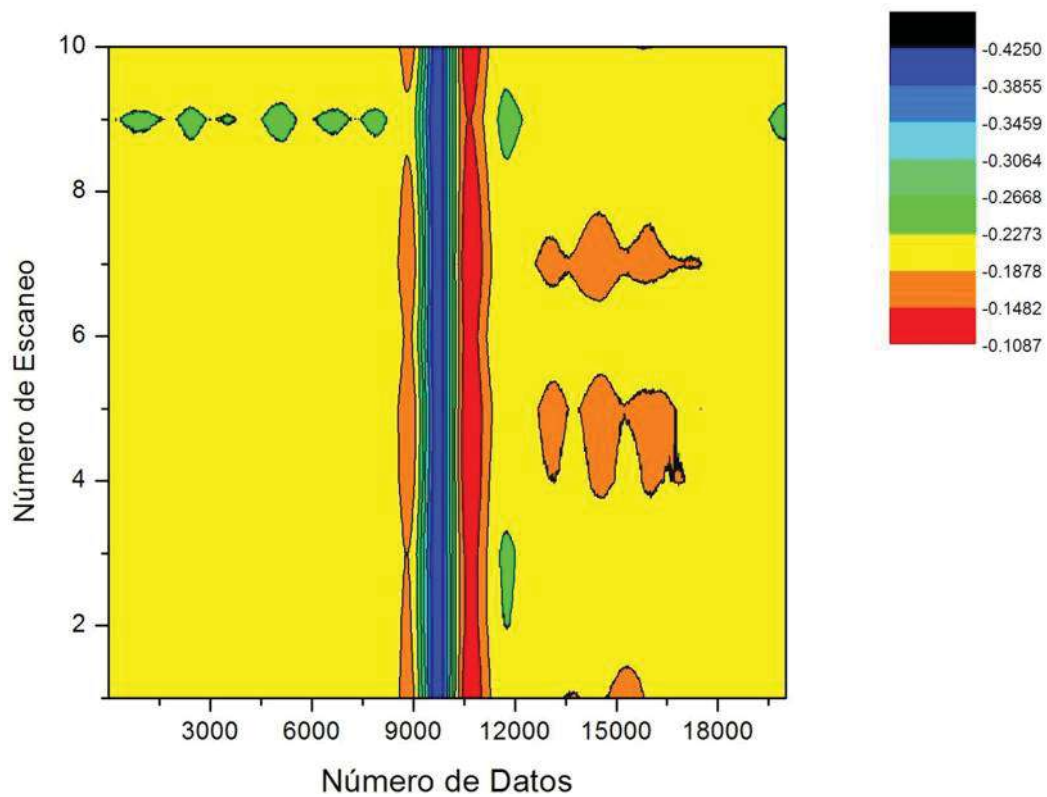


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 1 (diámetro de 1.27mm profundidad 10%, ganancia 100)

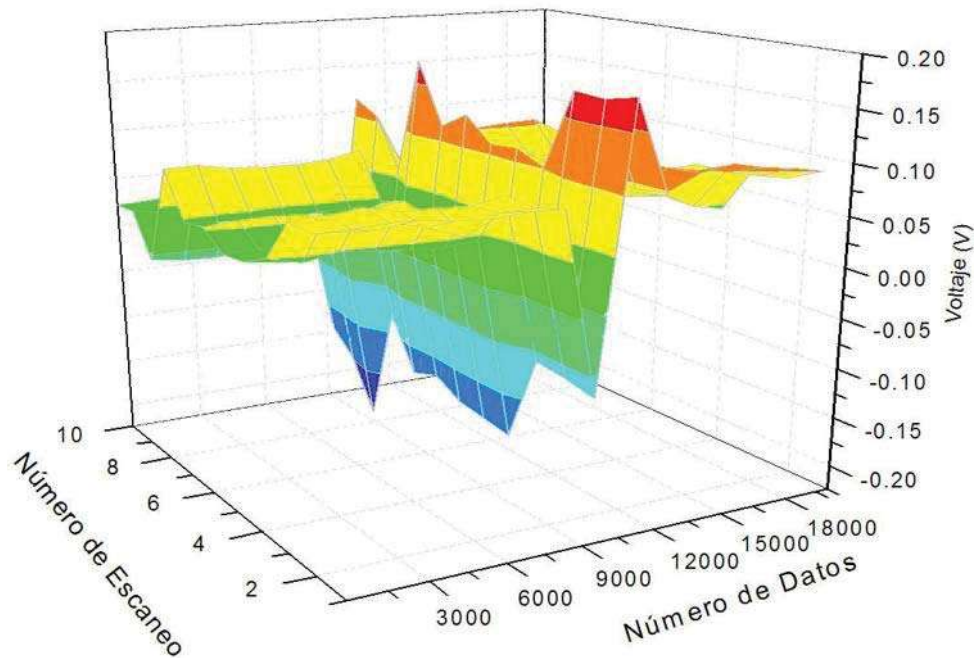


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

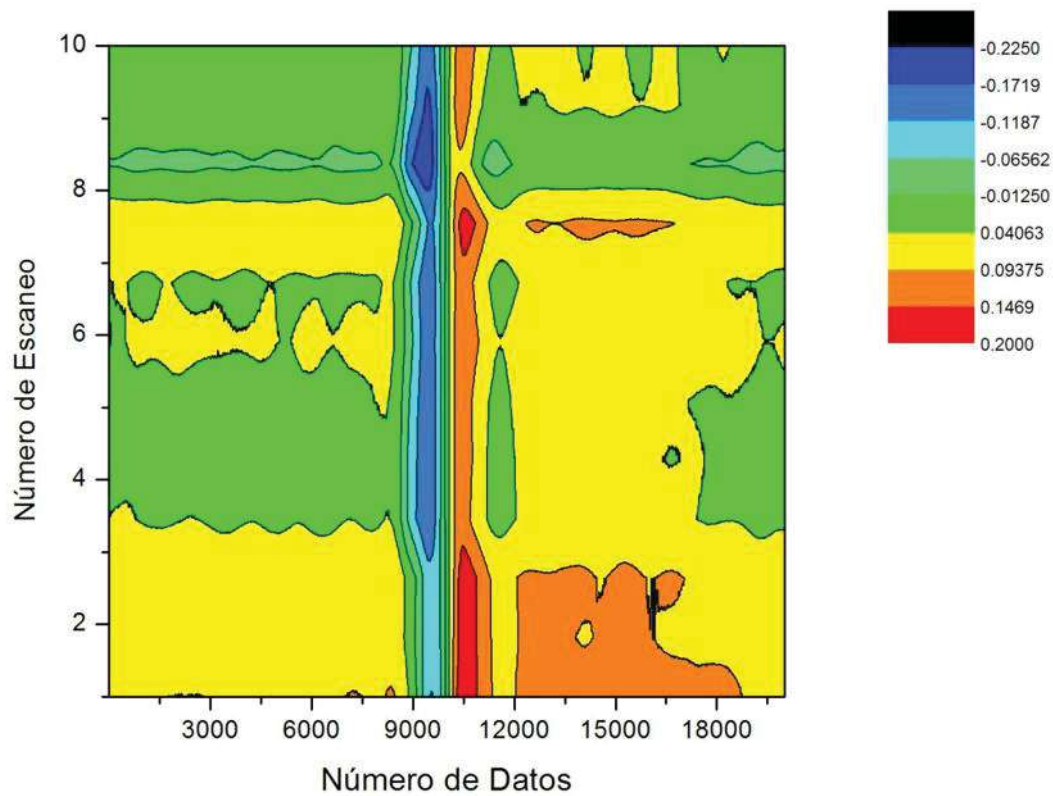


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 1.27mm profundidad 30%, ganancia 100)

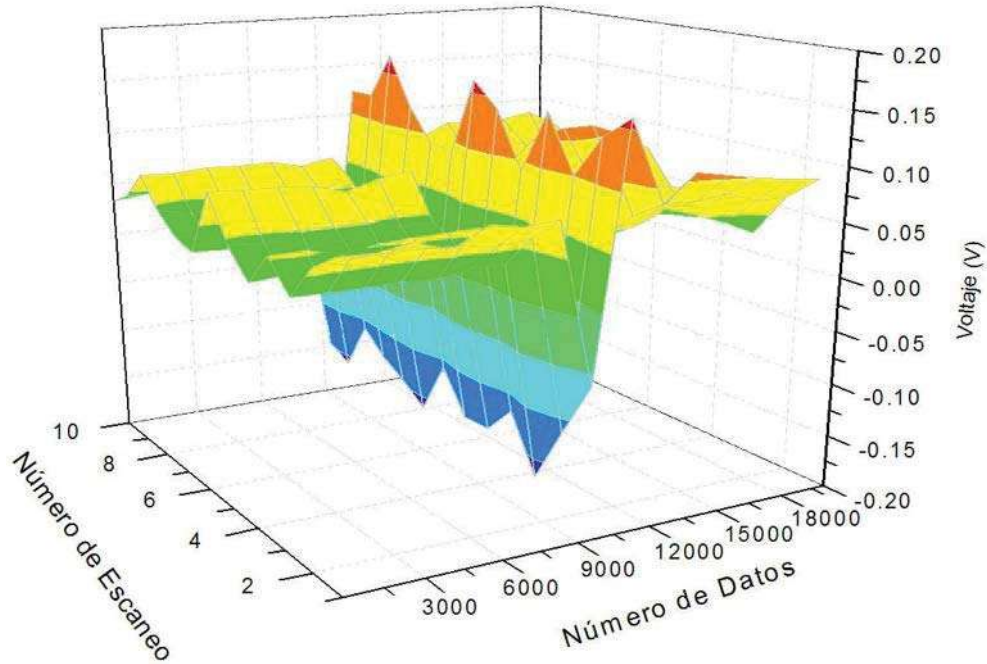


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

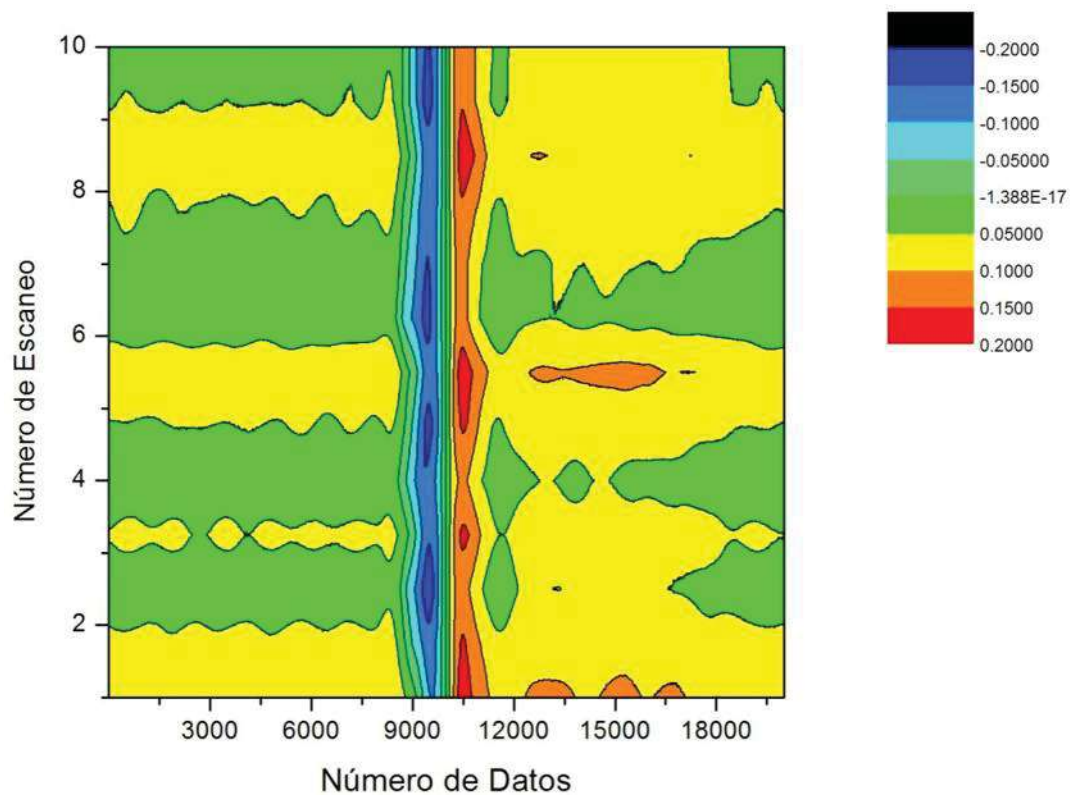


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 1.27mm profundidad 50%, ganancia 100)

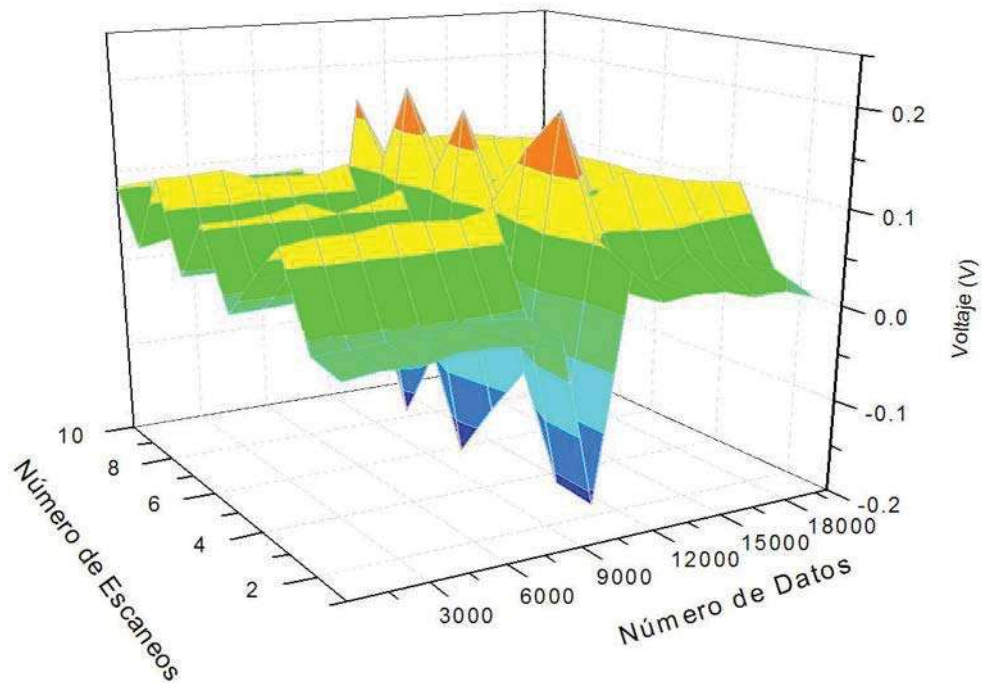


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

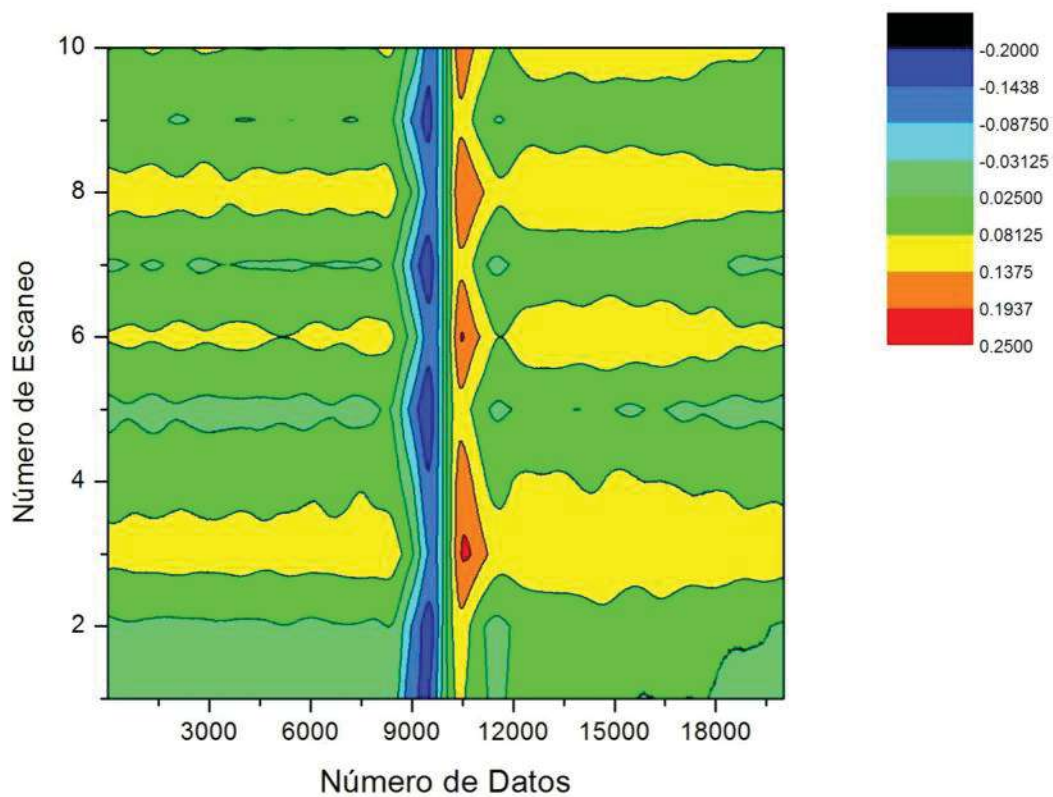


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 1 (diámetro de 0.79cm profundidad 10%, ganancia 20)

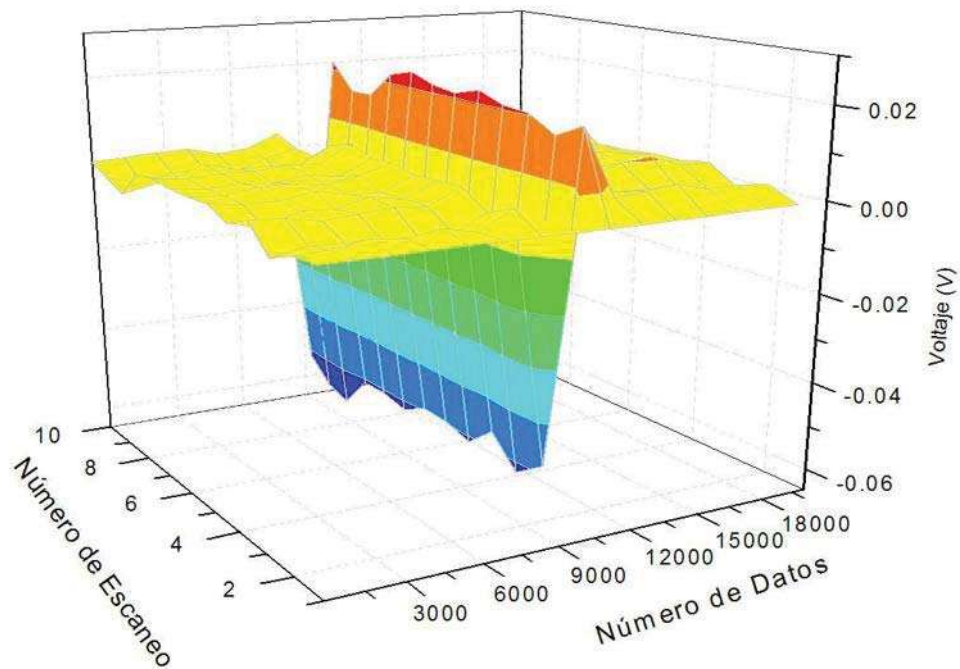


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

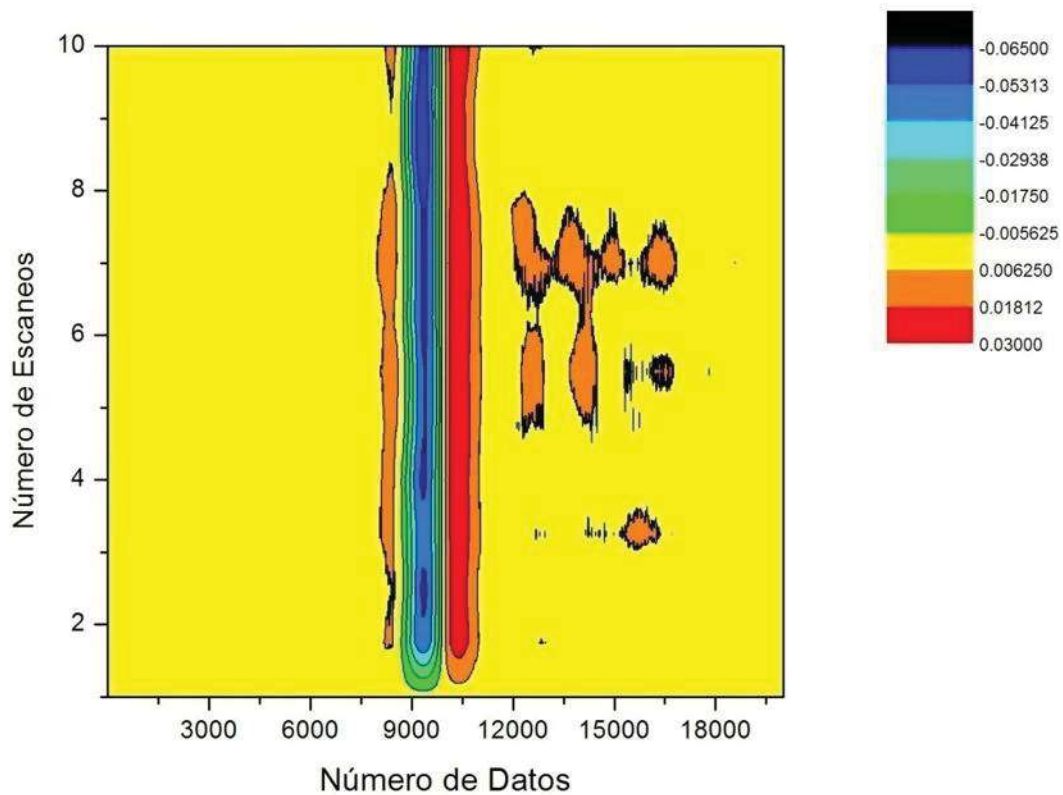


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 0.64cm profundidad 10%, ganancia 20)

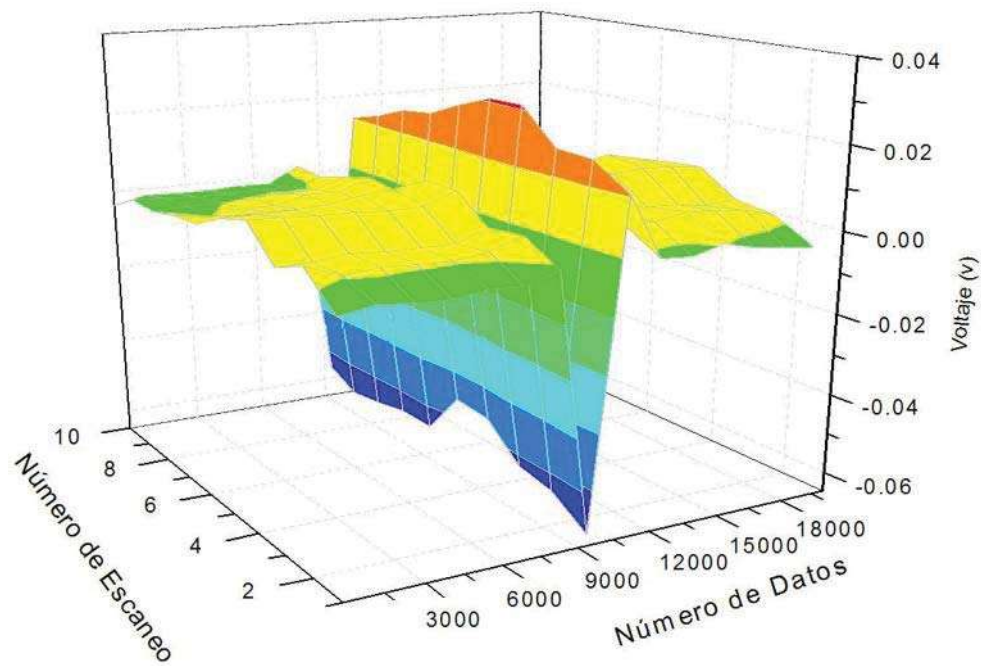


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

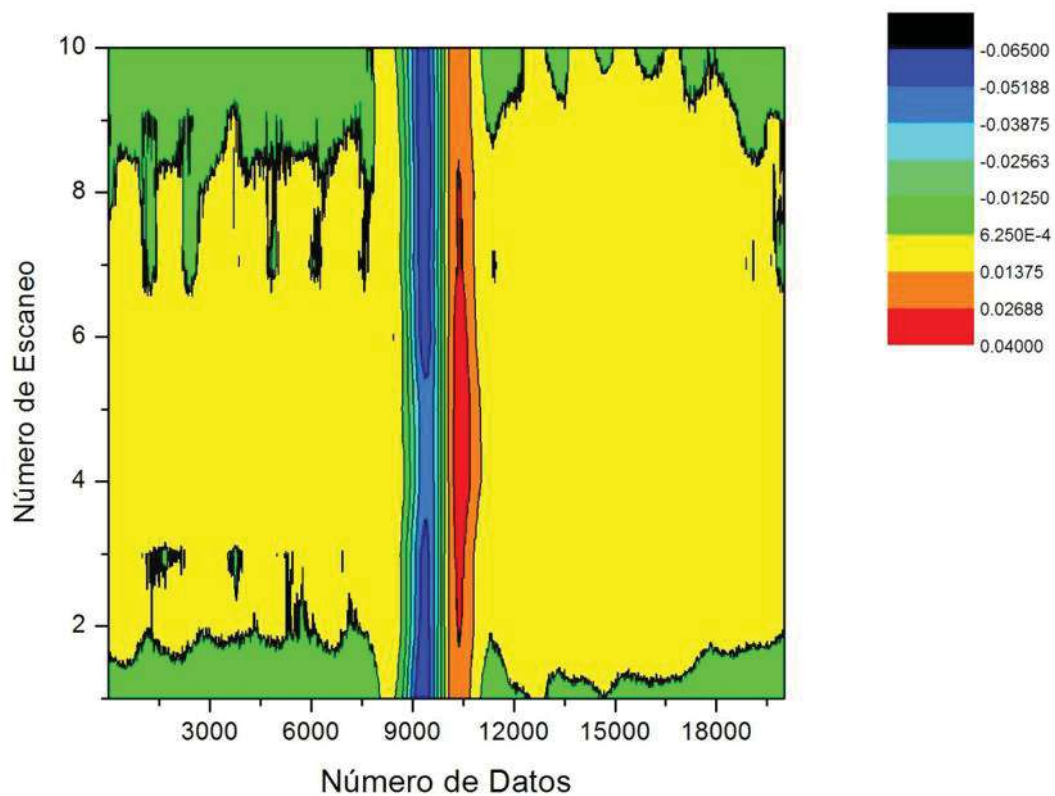


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 0.48cm profundidad 10%, ganancia 20)

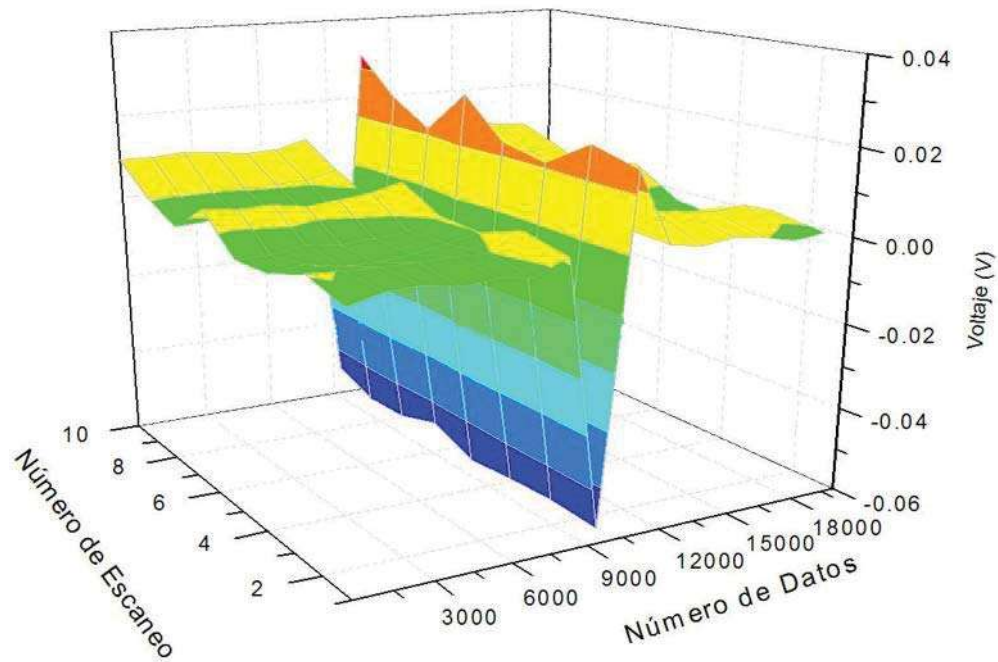


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

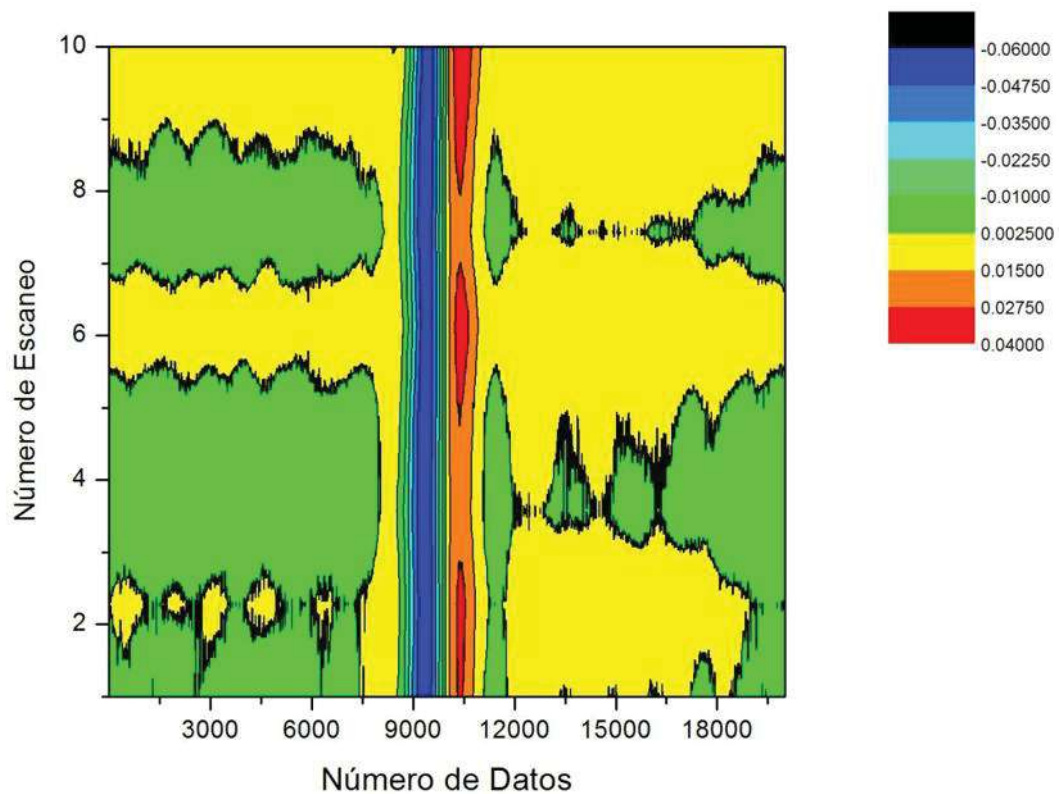


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 4 (diámetro de 0.32cm profundidad 10%, ganancia 20)

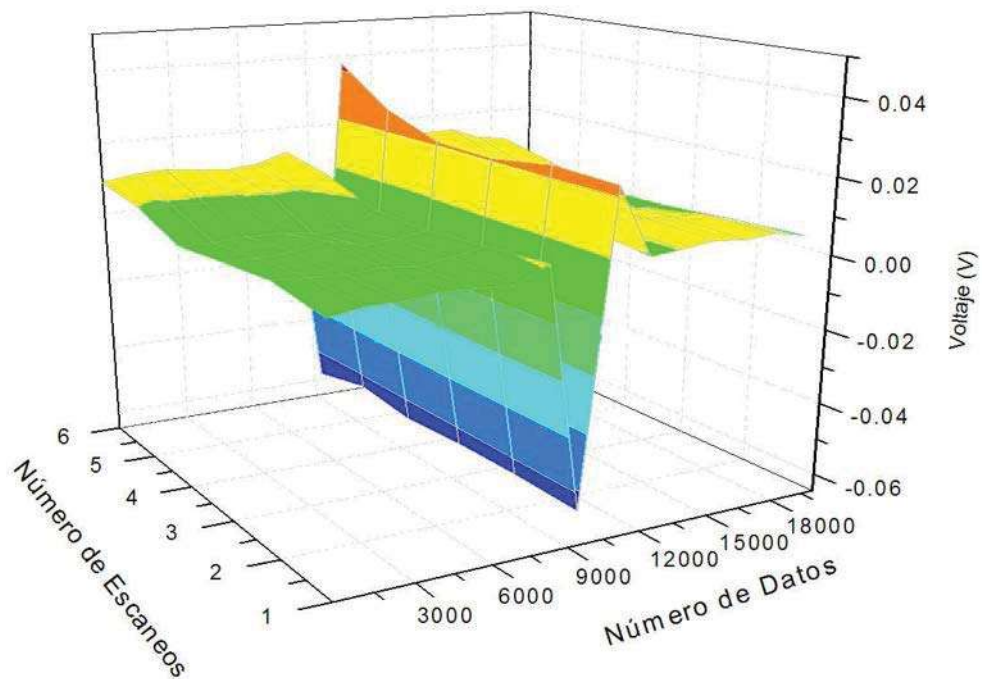


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

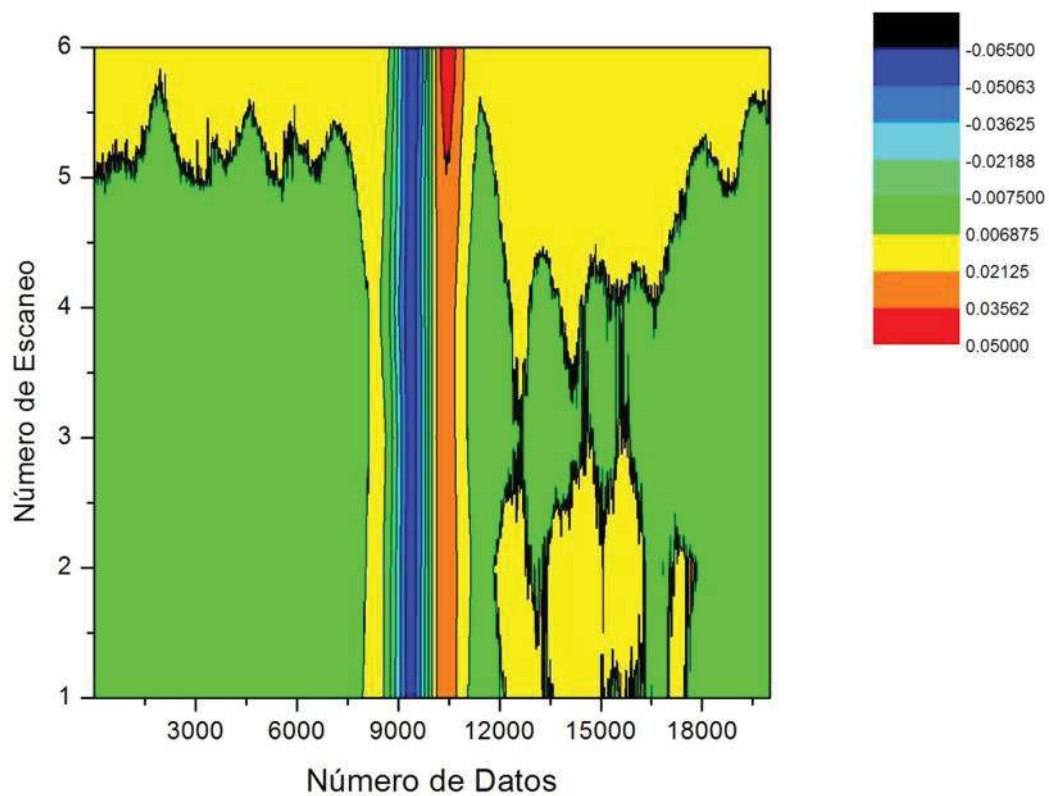


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 1 (diámetro de 0.79cm profundidad 10%, ganancia 50)

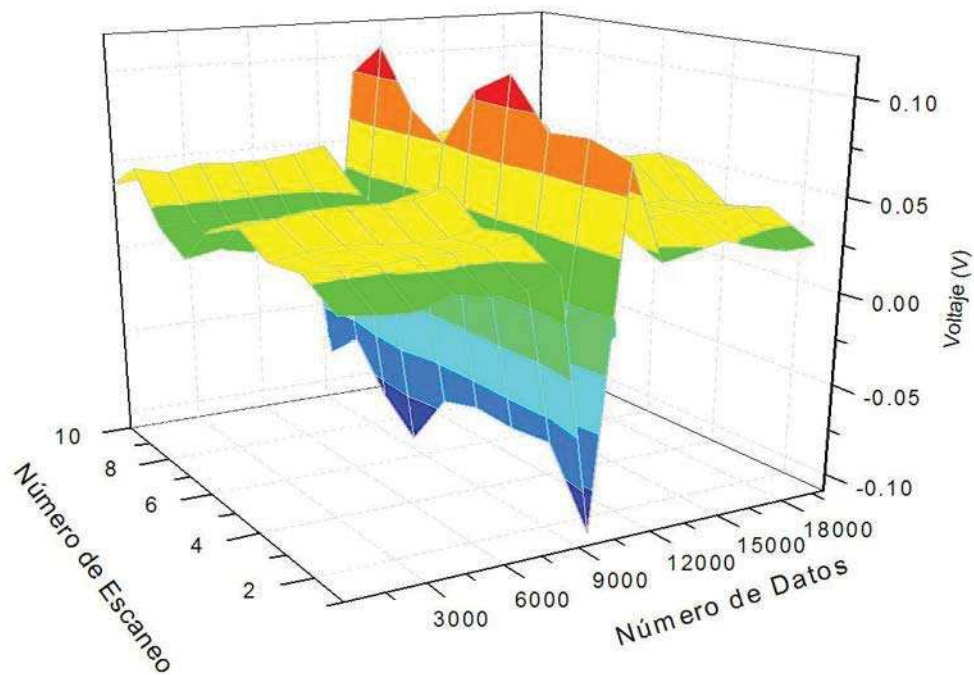


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

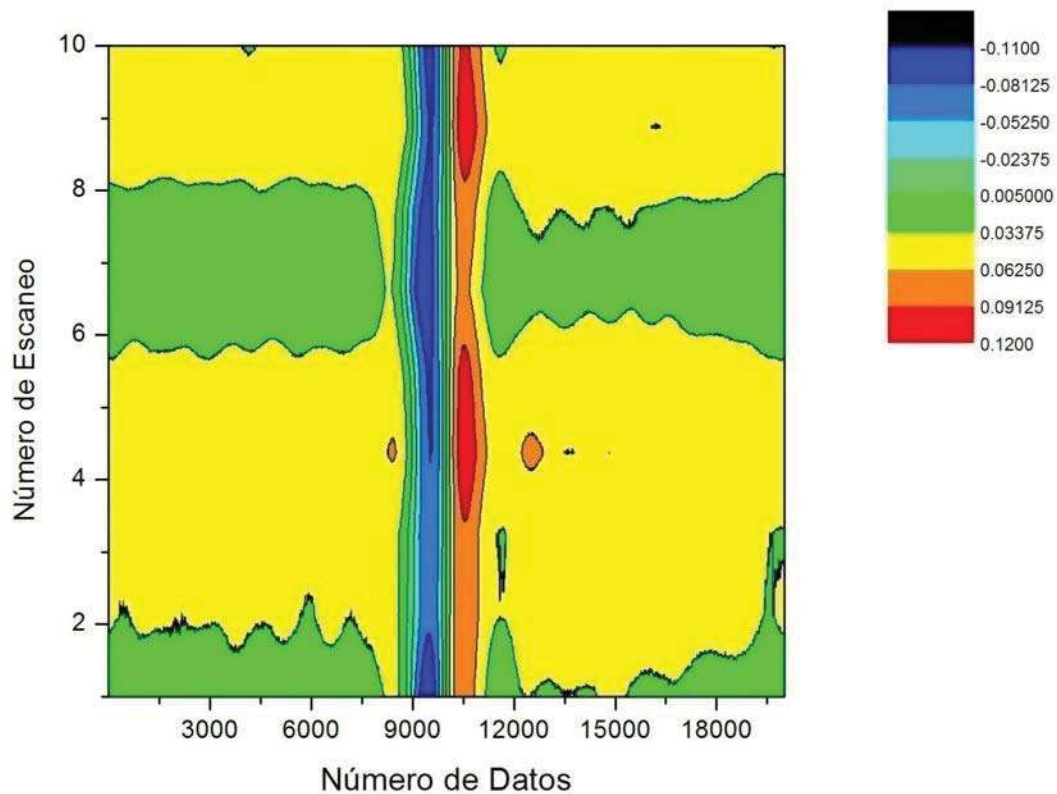


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 0.64cm profundidad 10%, ganancia 50)

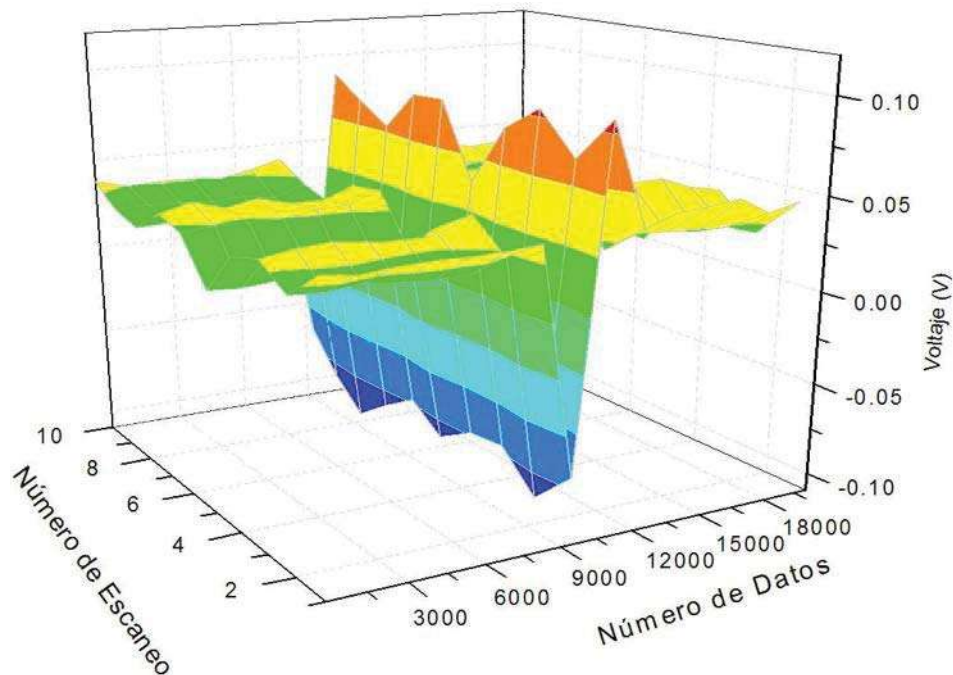


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

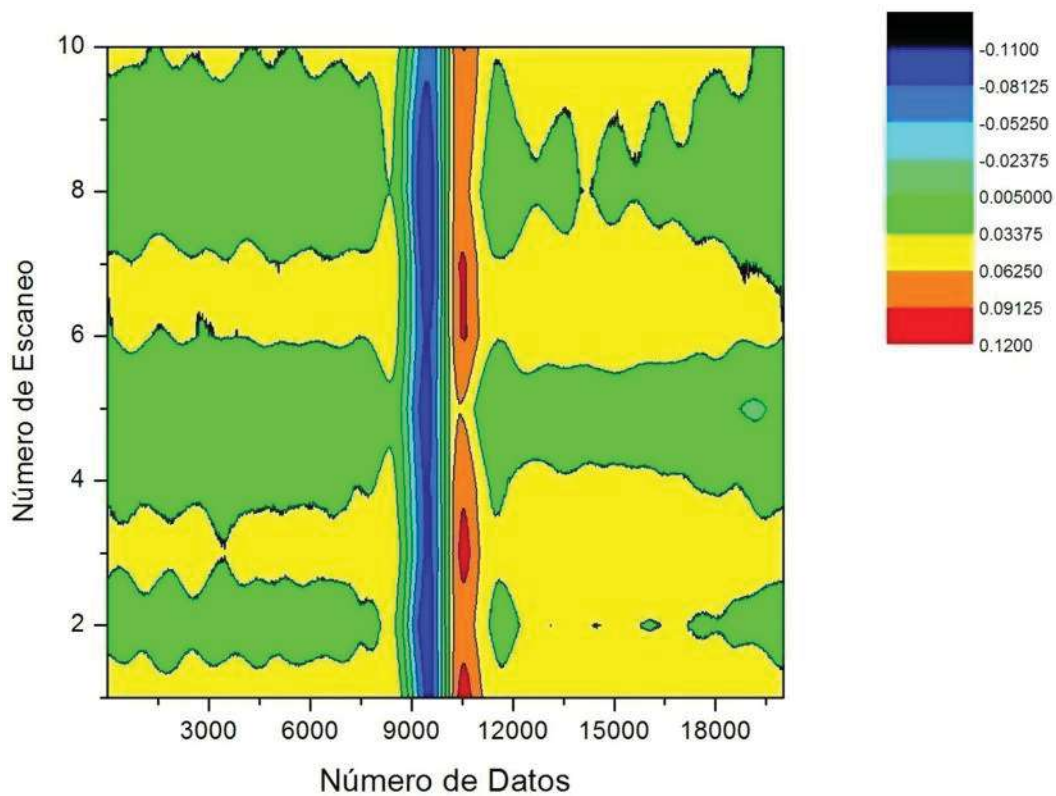


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 0.48cm profundidad 10%, ganancia 50)

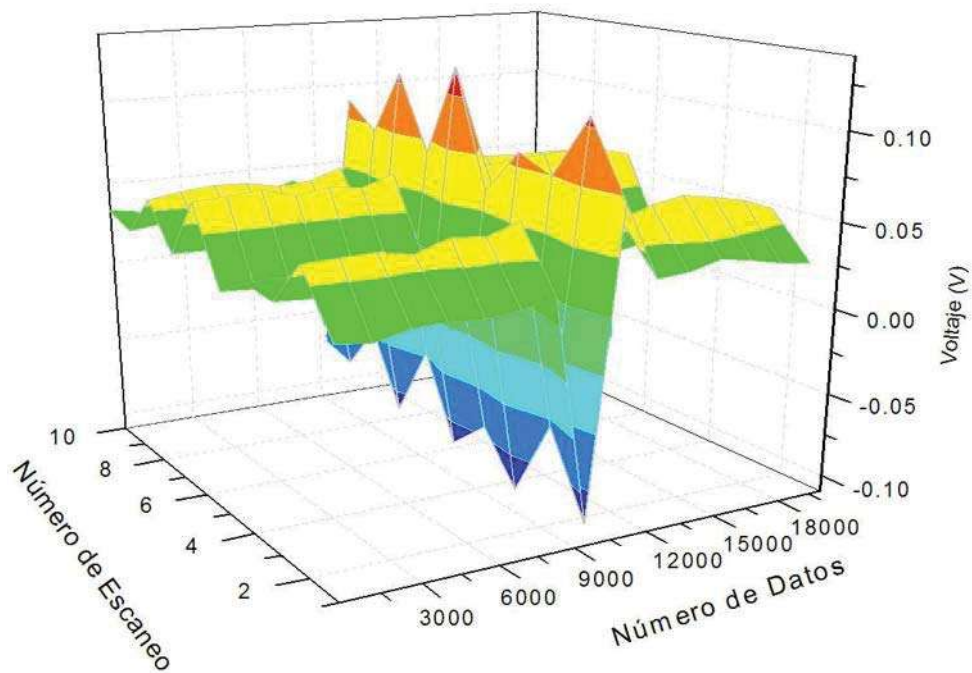


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

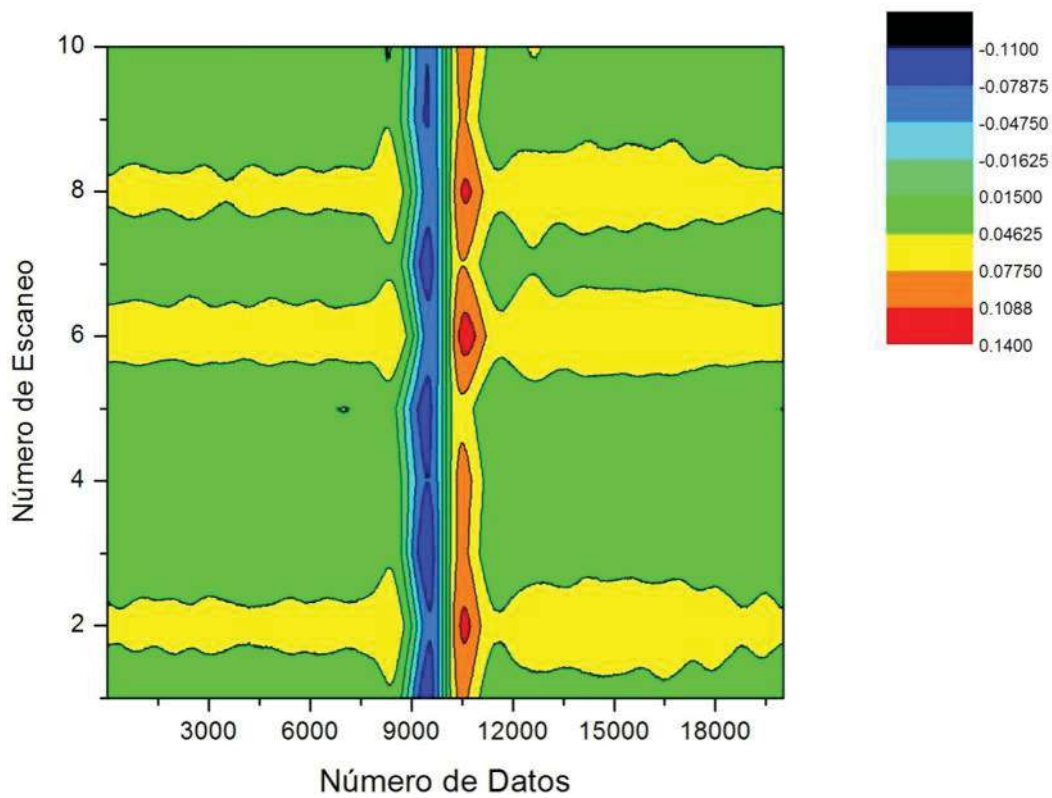


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 4 (diámetro de 0.32cm profundidad 10%, ganancia 50)

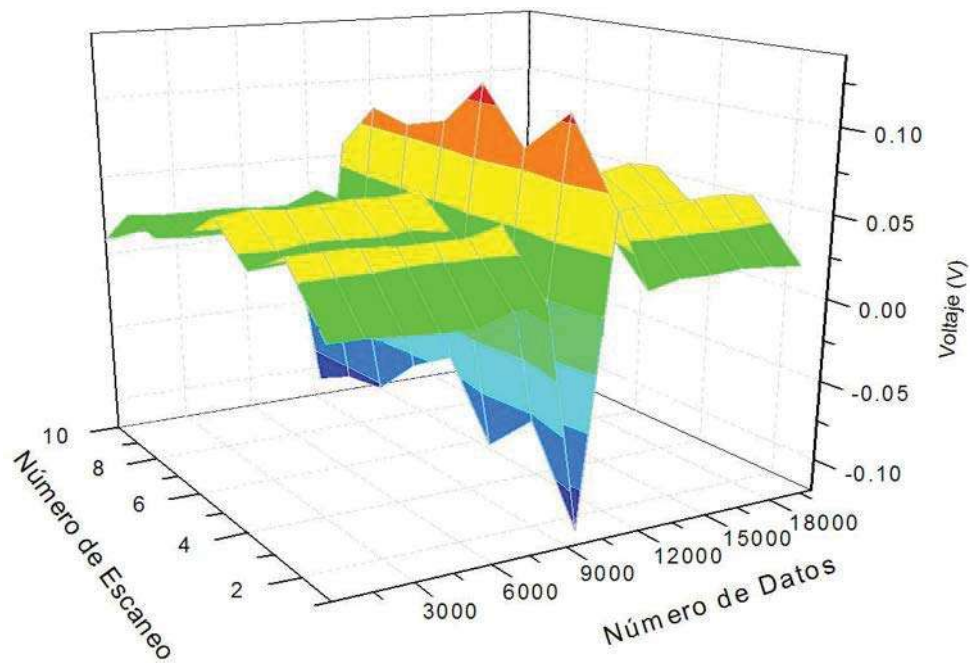


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

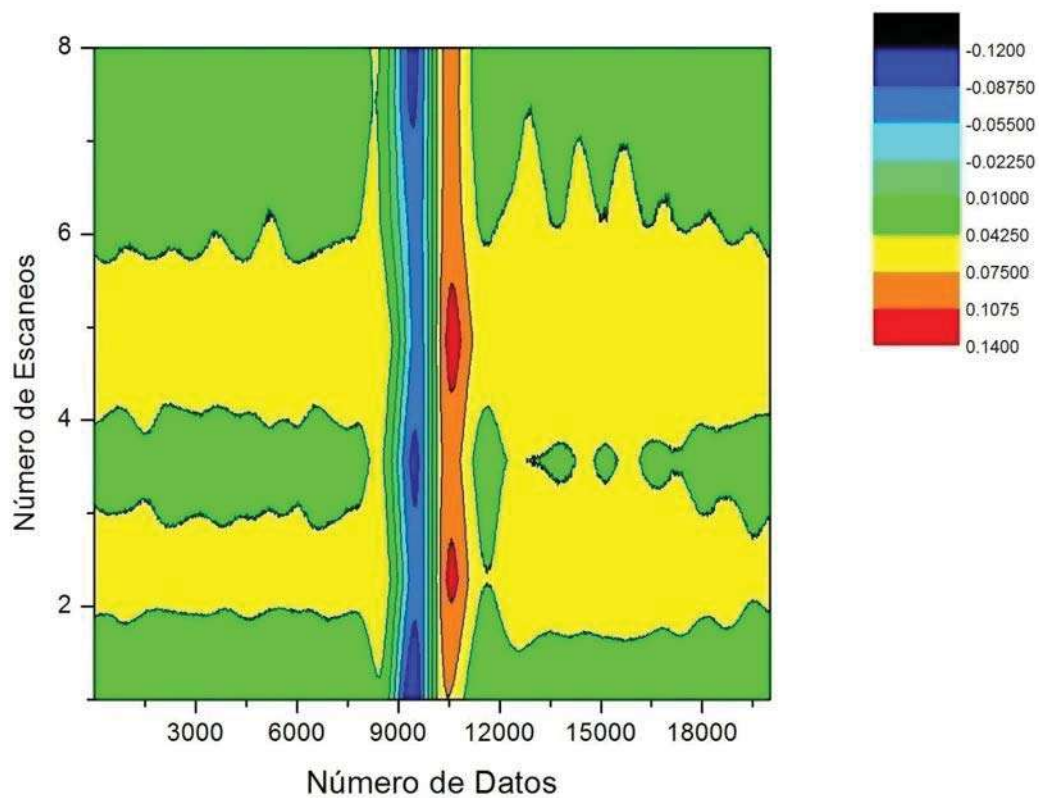


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 1 (diámetro de 0.79cm profundidad 10%, ganancia 100)

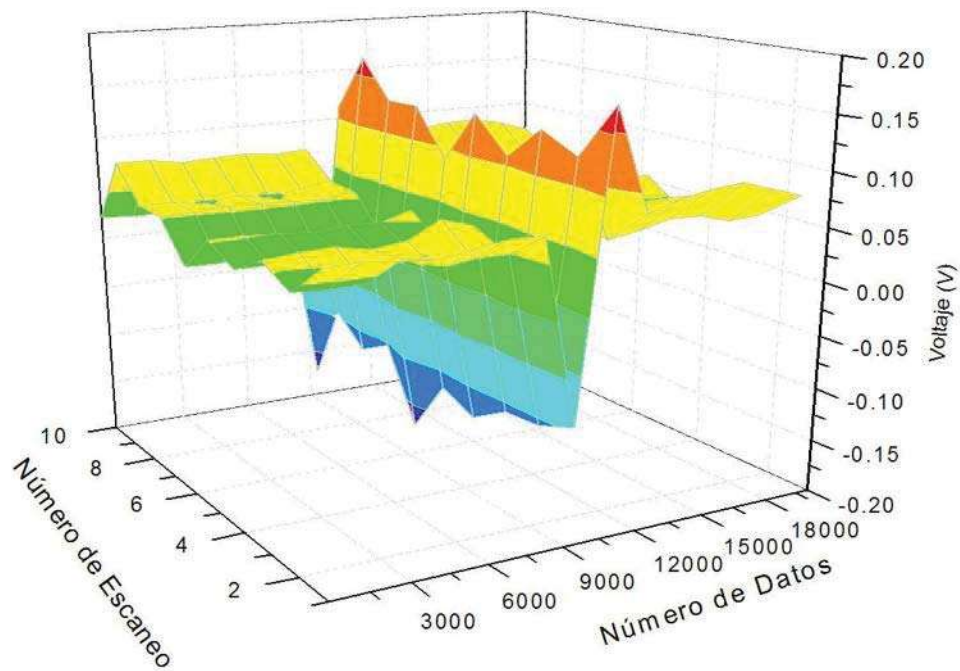


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

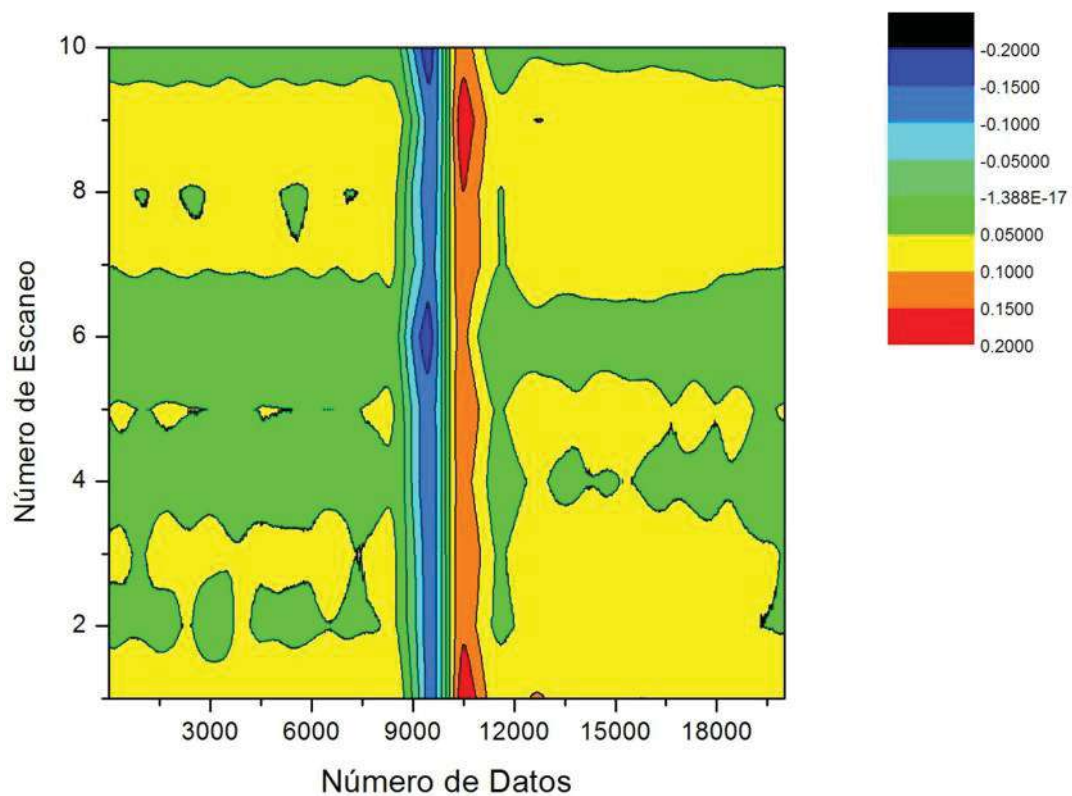


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 2 (diámetro de 0.64cm profundidad 10%, ganancia 100)

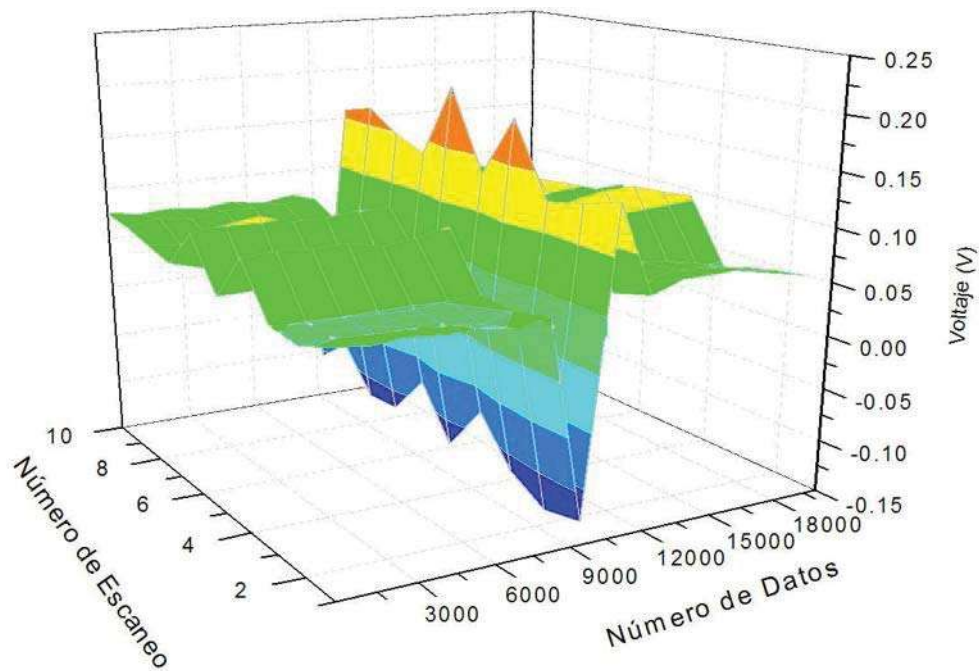


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

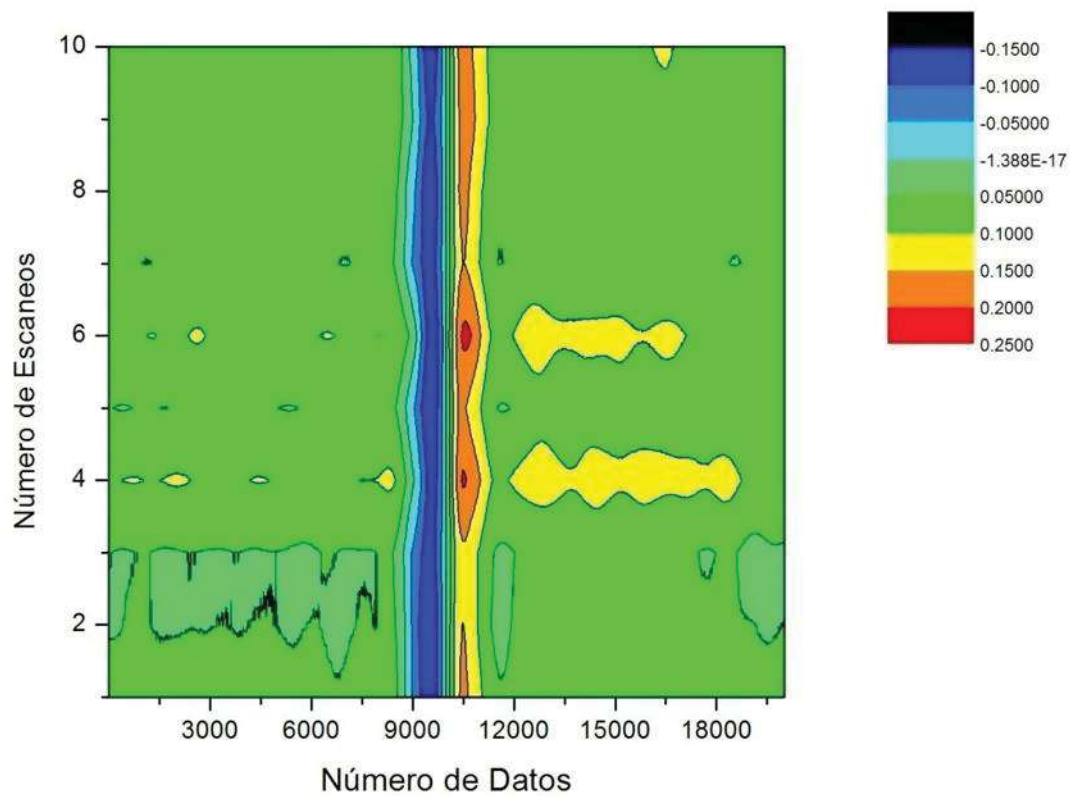


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 0.48cm profundidad 10%, ganancia 100)

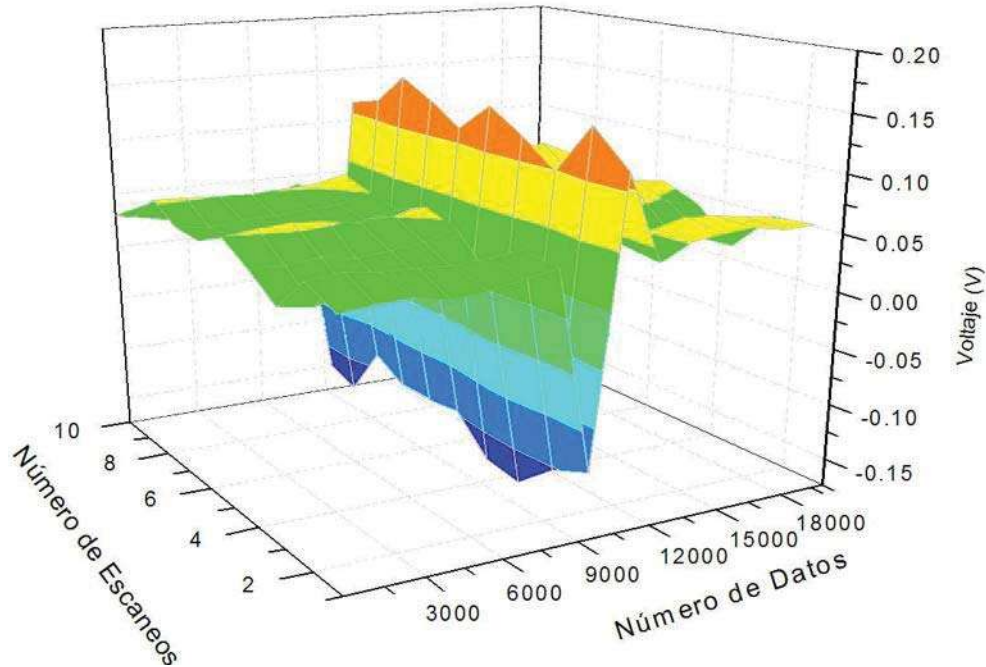


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

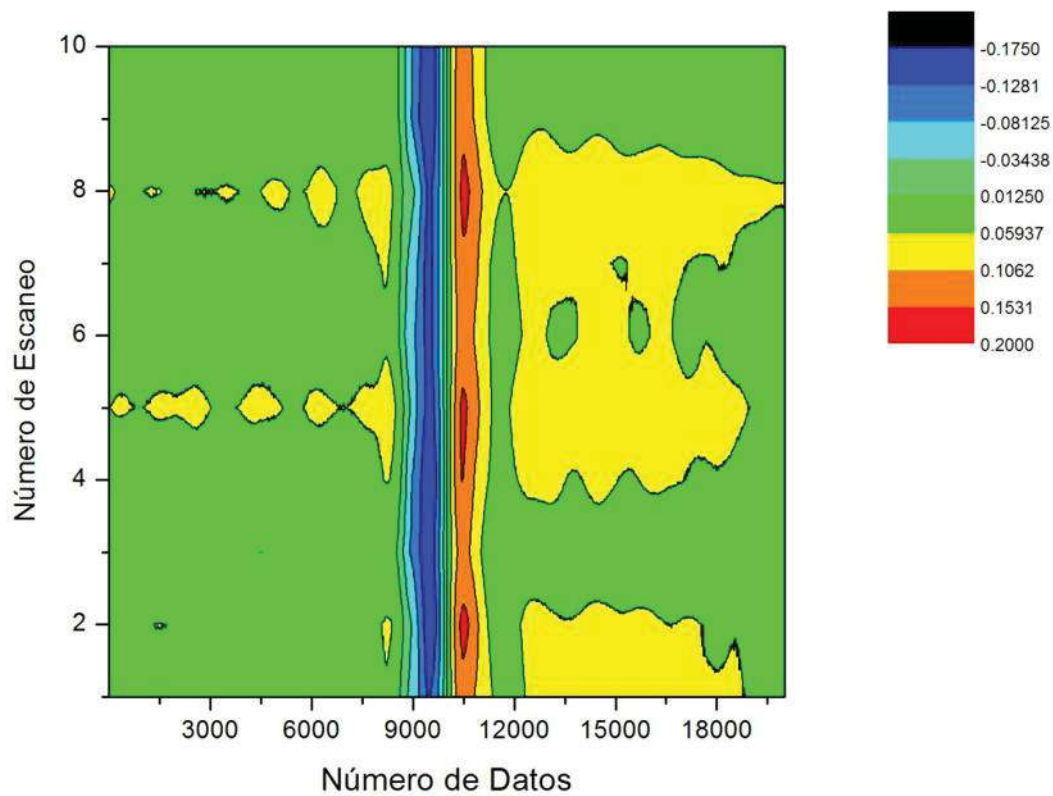


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.

Inclusión 3 (diámetro de 0.32cm profundidad 10%, ganancia 100)

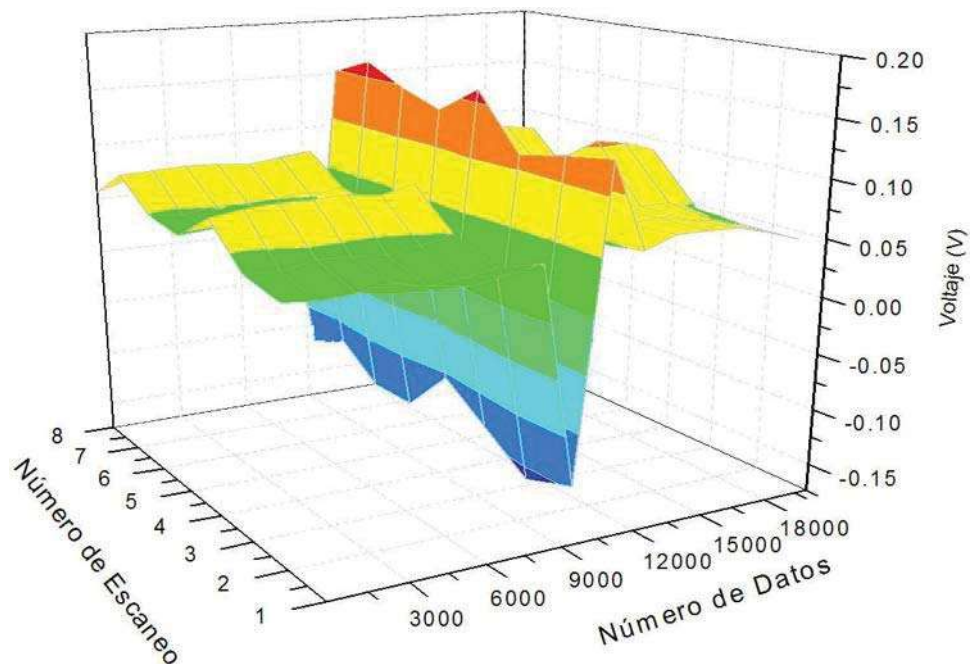


Imagen 3D de las mediciones de la densidad de flujo magnético.

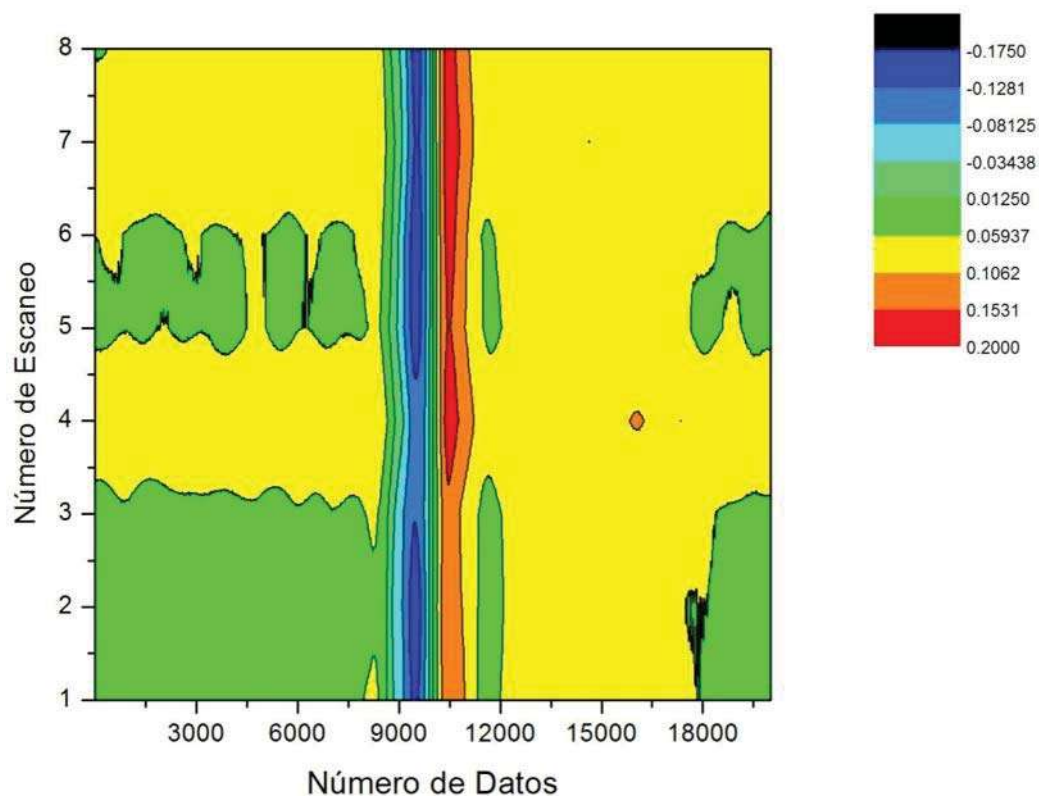


Imagen C-Scan de las mediciones de la densidad de flujo Magnético.