UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA CONSTRUCCIÓN Y EL HÁBITAT

POSGRADO

MODELADO Y MONITOREO DE GRIETAS EN TUBERÍAS FERROMAGNÉTICAS USANDO EL MÉTODO DE MEMORIA MAGNÉTICA METÁLICA.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA

PRESENTA

I.E.C. TAI SAY PUÓN DE LA CRUZ

DIRECTOR DE PROYECTO

Dr. AGUSTÍN L. HERRERA MAY.

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ MAYO 2019

Universidad Veracruzana
Dirección General de Administración Escolar
Oficialia Mayor

Dr. Agustín Leobardo Herrera May
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Aplicada U.V.
Boca del Río, Veracruz

En contestación a su oficio s/n de fecha 6 de mayo del año en curso, y con fundamento en la fracción XI del Articulo 183 del Estatuto General de esta Universidad, comunico a usted que, habiendo cumplido con los requisitos legales correspondientes *la* C. *Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones:* ***Tai Say Puón de la Cruz*** aspirante al grado de: ***Maestra en Ingeniería Aplicada*** se autoriza la celebración del Examen de Grado solicitado, que versará sobre el trabajo escrito intitulado ***"Modelado y monitoreo de grietas en tuberías ferromagnéticas usando el método de memoria magnética metálica".***

Pido a usted nos informe sobre los nombres de los sinodales que designe para integrar el Jurado del examen que se autoriza, así como el día, hora y resultado del mismo.

Atentamente
"Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz".
Mayo 8 de 2019

Carlos Arturo Gómez Vignola
Oficial Mayor

C.c.p. Dr. Héctor Francisco Coronel Brizio.- Director General de Administración Escolar.- Para su conocimiento.

75 ANIVERSARIO
Universidad Veracruzana
1944-2019

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Gracias a Dios por permitirme cumplir una meta mas en mi vida, y por estas palabras que me alentaron en todo momento. “Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas.” Josué 1:9

A mis padres Mario y Nilvia por su apoyo incondicional, por su confianza, paciencia y la motivación que me dan de seguir adelante en todo lo que haga, por sus palabras de aliento que me ayudaron a continuar. A mi hermana Seen-Ly porque siempre ha creído en mí, a mi hermana Yu-Lan que siempre me alentó a seguir adelante y por ser ejemplo para mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado durante el transcurso del posgrado, y con esto permitirme el realizar los estudios de la Maestría en Ingeniera Aplicada en la Universidad Veracruzana.

A la Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat de la Universidad Veracruzana por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto.

A mi asesor el Dr. Agustín Leobardo Herrera May por sus enseñanzas, por confiar en mí, por la paciencia en guiarme por el camino al conocimiento y desarrollo de esta investigación.

A mis profesores de asignatura por todo el conocimiento transmitido. A la Dra. Adriana del Carmen Wong Moreno, MC. Yuliana Berumen Díaz, Dr. Rogelio Portillo Vélez, Dr. Francisco Huerta López, Dr. Oscar Velázquez Camilo, Dra. Andrea G. Martínez López, Dr. Marco Osvaldo Vigueras Zúñiga por ayudarme en la mejora de mi preparación.

Al Centro de Investigación de Micro y Nano sistemas por las facilidades otorgadas del uso de instalaciones y equipo para desarrollar físicamente el sistema de mediciones.

Al Dr. J. Jesús Villegas Saucillo del Tecnológico Nacional de México en Celaya por sus finas atenciones y su apoyo para llevar a cabo estas mediciones.

A mis compañeros Sergio Santana Villaseñor, Marco Antonio Escarola Rosas y Josué Moisés Aguilar Garrido por su disposición y ayuda.

RESUMEN

La concentración de estrés es la principal razón para causar fallas y fatiga en el material. El método de memoria magnética metálica (MMM) es una nueva técnica de pruebas no destructivas (NDT) que es útil para la detección de grietas en tuberías usando el campo magnético natural del material, así como el campo geomagnético de la tierra. Esta técnica es efectiva para el diagnóstico antes del fallo de una pieza ferromagnética. Se presentó el principio del método de memoria magnética metálica y se usó el sistema de medición de grietas para tuberías ferromagnéticas para analizar cada muestra de grieta. Teniendo en cuenta que los modelos magnéticos se centran en la variación de la señal magnética con la tensión, por tanto, en esta investigación se documenta que se ha desarrollado un modelo de dipolo magnético lineal para representar la distribución del campo de fuga auto-magnética debido a la concentración de tensión en un tubo ferromagnético con muesca o defecto en tipo "V". La distribución de la densidad de carga magnética debe ser idéntica a la distribución de la densidad de dislocación en la zona plástica de una punta de grieta. Las simulaciones realizadas en esta investigación y el análisis nos muestran que tanto las componentes normales como tangenciales de las señales MMM obtenidas de cada una de las grietas pueden capturar características básicas con respecto a los daños tempranos en los defectos. Se analizan los resultados obtenidos con respecto a Hy que es la componente tangencial donde se analiza el valor correspondiente al máximo valor del campo magnético de fuga, y que depende de la profundidad de cada defecto con relación al ancho y la componente Hz que es la componente normal, nos da una idea de las componentes de fuga de flujo magnético para una grieta de tipo "V". El sistema ofrece flexibilidad, facilidad de adquisición de datos, adquisición de datos en tiempo real, bajo consumo de potencia, así como mejoras en costo en comparación con otros sistemas. El sistema que se reporta en esta investigación es un sensor (magnetómetro), dos motores a pasos NEMA-17, una tarjeta Arduino Uno para la adquisición de los datos, así como dos controladores (drive) DVR8825 en conjunto con una tarjeta Shield CNC para la etapa de potencia del sistema, el software que se utiliza es Arduino y Matlab para el manejo de la instrumentación. El método de memoria magnética metálica (MMM) difícilmente puede evaluar el daño temprano cuantitativamente debido la falta de un

modelo riguroso y coherente, además de ser muy difícil de hacer una evaluación efectiva.

ABSTRACT

The concentration of stress is the main reason to cause failures and fatigue in the material. The metallic magnetic memory (MMM) technique is a new non-destructive testing technique that is useful for detecting cracks in pipes using the natural magnetic field of the material, as well as the geomagnetic field of the earth. This technique is effective for the diagnosis before the failure of a ferromagnetic part. The principle of the magnetic memory method was presented and the crack measurement system for ferromagnetic pipes was used to analyze each crack sample. Taking into account that the previous magnetic models are mainly focused on the variation of the magnetic signal with the voltage, in this investigation it is documented that a linear magnetic dipole model has been developed to represent the distribution of the auto-magnetic leakage field due to the concentration of tension in a ferromagnetic tube with "V" type notch. The distribution of the magnetic charge density must be identical to the distribution of the dislocation density in the plastic area of a crack tip. The simulations carried out in this investigation and the analysis show us that both the normal and tangential components of the MMM signals obtained from each of the cracks can capture basic characteristics with respect to the early damages in the defects. The results obtained are analyzed with respect to Hy, which is the tangential component where the value corresponding to the maximum value of the leak magnetic field is analyzed, and which depends on the depth of each defect in relation to the width. and the Hz component which is the normal component, gives us an idea of the magnetic flux leakage components for a "V" type crack. The system offers flexibility, ease of data acquisition, data acquisition in real time, low power consumption, as well as cost improvements compared to other systems. The system reported in this research is a sensor (magnetometer), two NEMA-17 stepper motors, an Arduino Uno card for data acquisition, as well as two DVR8825 drivers (drive) in conjunction with a CNC Shield card for the power stage of the system, the software that is used is Arduino and Matlab for the handling of the instrumentation. The technique of metallic magnetic memory (MMM) can hardly assess the early damage quantitatively due to the lack of a rigorous and coherent model, as well as being very difficult to make an effective evaluation.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS PERSONALES ii
AGRADECIMIENTOS iii
RESUMEN iv
ABSTRACT vi
INTRODUCCION 1
1.1 Historia del método de memoria magnética. 1
1.2 Objetivos 3
1.3 Planteamiento del problema. 3
1.3.1 El estudio de la variación del campo magnético. 4
1.4 Justificación. 5
1.5 Hipótesis. 6
1.6 Contribuciones 6
ANTECEDENTES 7
2.1 Descripción del Método de Memoria Magnética Metálica. 7
2.2 Dispersión del campo magnético de fuga (SMFL). 10
2.3 Zona de concentración de estrés (SCZ). 10
2.4 Fundamentos del método: Principios físicos básicos. 11
2.5 Campos magnéticos de dispersión. 13
2.5.1 Intensidad de dispersión del campo magnético (Hp[A/m]). 15
2.5.2 Discretización de la medición del campo (Hp). 15
2.6 Modelo de Dipolo magnético: ecuaciones de Maxwell. 16
2.7 Modelo del dipolo magnético: contribuciones de MFL. 19
RESULTADOS EXPERIMENTALES 24
3.1 Reconocimiento de Patrones. 25
3.2 Defectos geométricos. 26
3.3 Descripción de Señales MFL. 28
3.4 Modelo Analítico: Defecto "V". 44
DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN 54
4.1 Sistemas expertos. 54
4.2 Maquinado de defectos tipo "V" en tubo ferromagnético ASTM-A-36. 56

4.3 Disco Reductor de velocidad. 59
4.4 Base de soporte para tubo ferromagnético. 60
4.5 Motor a pasos NEMA-17. 61
4.6 Sensor magnético efecto Hall MAG3110. 62
4.6 Etapa de potencia. 64
4.6.1Tarjeta Arduino Uno. 64
4.6.2 Controladores DRV8825. 65
4.6.3 Tarjeta CNC Shield. 68
4.8 Sistema para la adquisición de datos. 69
4.9 Programación de motores en Arduino. 70
4.10 Programación para adquisición de datos en Matlab. 73
CONCLUSIONES 74
REFERENCIAS 75
ANEXOS.....77

Lista de Figuras

Figura 1.1. Señales SMLF en tubería ferromagnética.

Figura 2.1. Perturbación magnética natural.

Figura 2.2. Perturbación magnética con defecto en el tubo ferromagnético.

Figura 2.3. Principio del método MMM.

Figura 2.4. Fuga de campo magnético en defecto.

Figura 2.5. Grieta tipo “V” de la componente tangencial en Hz.

Figura 2.6. Grieta tipo “V” de la componente normal en Hy.

Figura 2.7. Componentes 2D del defecto tipo “V” hacia el punto P.

Figura 2.8. Plano del punto de origen del sistema.

Figura 2.9. Identificación de variables defecto tipo “V”.

Figura 3.1. Sistema de detección de grietas en tuberías ferromagnéticas.

Figura 3.2. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V”.

Figura 3.3. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo semi elípticos.

Figura 3.4. Defecto tipo “V” llamado tipo muesca.

Figura 3.5. Vista frontal de tubo ferromagnético con defecto tipo “V” llamado también muesca.

Figura 3.6. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.7. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.8. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.9. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.10. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.11. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.12. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Figura 3.13. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo V normalizada.

Figura 3.14. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.15. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.16. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.17. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.18. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.19. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.20. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.
Figura 3.21. Modelo equivalente de dipolo magnético de zona de concentración de estrés.
Figura 3.22. Densidad de dislocación y distribución de densidad de carga magnética.
Figura 3.23. Modelo del campo magnético de auto-fuga magnética en zona de concentración de estrés.
Figura 3.24. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de la fuga de campo magnético, componente tangencial.
Figura 3.25. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de la fuga de campo magnético, componente normal.
Figura 3.26. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de fuga de campo magnético que se obtiene por Matlab, componente tangencial.
Figura 3.27. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de fuga de campo magnético que se obtiene por Matlab, componente normal.
Figura 4.1. Sistema de detección de fuga de campo magnético.
Figura 4.2. Tubo ferromagnético ASTM-A-36.
Figura 4.3. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 colocado en la CNC para maquinado de defectos tipo “V”.
Figura 4.4. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V”.

Figura 4.5. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V” terminados.

Figura 4.6. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo semi elíptica.

Figura 4.7. Disco reductor de velocidad sin muescas.

Figura 4.8. Disco reductor de velocidad maquinado con muescas.

Figura 4.9. Sistema mecánico rotativo.

Figura 4.10. Motor paso a paso NEMA 17.

Figura 4.11. Magnetómetro MAG3110.

Figura 4.12. Soporte de sensor MAG3110 y distancia (lift-off) a la que se coloca el sensor.

Figura 4.13. Tarjeta Arduino Uno para la adquisición de datos.

Figura 4.14. Conexión de sensor MAG3110 a tarjeta Arduino uno.

Figura 4.15. Diagrama de alambrado de conexión del microcontrolador DVR8825 a motor paso a paso NEMA-17.

Figura 4.16. Conexión de los motores a pasos NEMA-17 con los dos drives DVR8825.

Figura 4.17. Drive DVR8825 en tarjeta CNC Shield.

Figura 4.18. Tarjeta CNC Shield para Arduino.

Figura 4.19. Asignacion de variables para la programacion de Motor 1 y Motor 2 NEMA-17 en Arduino.

Figura 4.20. Asignacion de puestos para la programacion de Motor 1 en Arduino.

Figura 4.21. Asignacion de puestos para la programacion de Motor 2 en Arduino.

Figura 4.22. Asignación de puertos para habilitar, cambio de direccion de giro de Motor 1 y Motor 2 en Arduino.

Figura 4.23. Programación de interfaz.

Figura 4.24. Asignacion de datos a introducir en el programa para funcionamiento de motores (grados, direccion de motor dedrecha o izquierda, selección el motor 1 o 2).

Figura 4.25. Sistema DAC que consiste en un sensor, hardware de medidas para la DAQ y una PC con software programable.

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Definición de variables.

Tabla 3.1 Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S1.

Tabla 3.2. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S2.

Tabla 3.3. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S3.

Tabla 3.4 Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S4.

Tabla 3.5. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S5.

Tabla 4.1. Parámetros de los defectos tipo “V” en el tubo ferromagnético ASTM-A-36.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Historia del método de memoria magnética.

Las pruebas magnéticas conocido como un método de Prueba No Destructiva, se basa en el principio físico conocido como Magnetismo, el cual exhiben principalmente los materiales ferrosos como el acero y, consiste en la capacidad o poder de atracción entre metales; es decir, cuando un metal es magnético, atrae en sus extremos o polos a otros metales igualmente magnéticos o con capacidad para magnetizarse.

Las pruebas no destructivas (por sus siglas en ingles NDT) son las técnicas y métodos que nos permiten detectar en su etapa inicial los daños como fracturas, en material ferromagnético, y entre estos métodos de NTD se encuentran, el método de examinación visual (VE), prueba ultrasónica (UT), radiografía (RT), pruebas magnéticas, pruebas de corrientes eddy (ET) etc., estos métodos son de gran ayuda para la aplicación de industria en la detección, interpretación y medición de defectos desarrollados en materiales ferromagnéticos, tuberías, juntas, soldaduras etc. (Dubov & Kolokolnikov, 2014). Lo cual para la industria es inaceptable desde el punto de vista de la seguridad.

Las piezas ferromagnéticas poseen una magnetización natural, que se altera localmente en las regiones de concentración de esfuerzos. Como consecuencia, esas regiones pueden ser detectadas y ubicadas midiendo el campo magnético asociado a la magnetización natural y sus variaciones en la superficie de la pieza denominado campo magnético de fuga. Entonces se puede detectar en forma no destructiva lugares donde hay o puede haber defectos relevantes. En última instancia, en esto consiste la utilidad principal del método de memoria magnética metálica, ideado y puesto a punto en Rusia por (Dubov A. A., 1995).

La mayor parte de los procesos de deterioro y falla mecánica en estructuras o máquinas comienza en regiones donde las tensiones se encuentran concentradas y las deformaciones locales son mucho mayores que la deformación promedio.

El concepto de «memoria magnética metálica» fue introducido por primera vez en 1994. Antes de ese momento no fue utilizado en la literatura técnica. Los siguientes términos y conceptos conocidos: «Memoria magnética de la Tierra» - en estudios arqueológicos; «Memoria magnética» - en grabación de sonido; «Efecto memoria de forma» debido a estructural y transformaciones de fase orientadas por tensiones internas en productos de metal.

Basado en la correlación establecida con los fenómenos físicos de los procesos de dislocación, el concepto de «memoria magnética metálica» se introdujo en los productos de metales y un nuevo método de diagnóstico fue desarrollado.

En la actualidad este método ha despertado un interés considerable en la comunidad que se ocupa de las pruebas no destructivas, así como en personas que diseñan, construyen o mantienen estructuras y máquinas con componentes ferromagnéticos.

La singularidad del método de memoria magnética metálica es que se basa en el uso del campo de fuga auto-magnética (SMLF). La Figura 1.1 muestra como ocurre la SMLF debido a la formación de acumulaciones en los límites de dominio de las dislocaciones de alta densidad (paredes de dislocación).

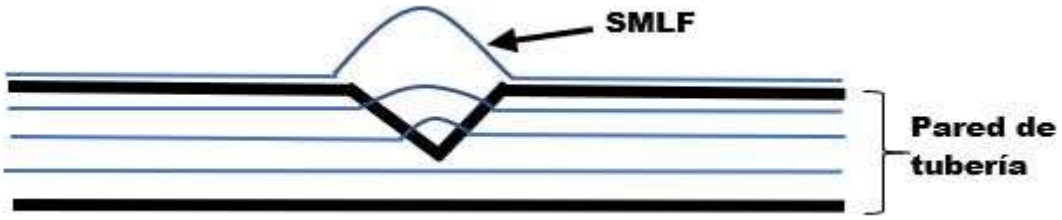


Figura 1.1. Señales SMLF en tubería ferromagnética

Los fundamentos físicos de la aparición de SMLF son principalmente diferentes en comparación con campos de fuga magnética (FML) que se producen en defectos de productos en donde su magnetización utiliza métodos magnéticos como Non-destructive testing (por sus siglas en ingles NDT) que son bien conocidos.

Las SMLF ocurren en zonas locales (desde 0,1 hasta decenas de micras) en la superficie y en capas de profundidad de productos metálicos. Nadie ha realizado una investigación de SMLF y los fundamentos físicos de su ocurrencia hasta el "nacimiento" de MMM.

Por lo tanto, se necesita un conocimiento profundo de las fisuras en tuberías (defecto típico en juntas soldadas), también sobre las variaciones residuales del campo magnético por la carga de trabajo y los tratamientos térmicos que afectan la evaluación de defectos.

1.2 Objetivos

Esta investigación tiene como objetivo presentar los análisis cuantitativos del defecto, por ejemplo, la profundidad del defecto, la ubicación y la influencia de las señales SMFL en los tubos ferromagnéticos de la zona de concentración de estrés.

- Modelado de la variación del campo magnético con respecto a la variación de parámetros de defectos geométricos.
- Elaboración del banco de pruebas del defecto geométrico de tuberías ferromagnéticas.
- Medición de la variación del campo magnético con defectos tipo “V”.
- Desarrollo del sistema experto. Algoritmo de procesamiento de datos y visualización de los defectos geométricos.

1.3 Planteamiento del problema.

Debido a la concentración de estrés, las tuberías o estructuras pueden resultar con daño debido a la concentración de estrés. Por tal motivo, se han realizado pruebas que nos muestran que el cambio del campo magnético sobre la superficie en la

región del daño cambia regularmente. El campo magnético era mucho más fuerte que antes de que aparecieran los daños (Zhong, Li, & Chen, 2008). Se realizan pruebas en tuberías con diferentes tamaños de grietas para señalar los cambios del campo magnético debido a la fatiga y grietas.

1.3.1 El estudio de la variación del campo magnético.

Los principales puntos que desarrollar en esta tesis son los siguientes:

- El desarrollo de esta investigación se realizará a nivel laboratorio.
- La investigación solo analiza grietas externas en tubos ferromagnéticos externos.
- Comprobar experimentalmente el modelo anterior.
- No se incluyen los esfuerzos residuales o inclusión.
- Desarrollar banco de pruebas del defecto geométrico de tuberías ferromagnéticas y un sistema de detección de campo magnético usando un sensor del tipo MAG3110 y tubo acero de estructural A36.
- Desarrollar el sistema experto para la adquisición, procesamiento, análisis, toma de decisiones, basado en un método que permita visualizar e interpretar el tipo de grieta.
- El modelado analítico y numérico solo incluirá los tipos de defectos geométricos.
- Las dimensiones de grietas (longitud, anchura y profundidad).
- Discusión de los resultados experimentales y comparación con los modelos analíticos y numéricos.

El estudio resulta ser exploratorio en términos de las mediciones de la variación del campo magnético a través del sistema mecánico de monitoreo con el sensor de campo magnéticos previamente determinado, se realiza en el tiempo presente y en un entorno controlado. Esta población será sometida al análisis de los datos que aporte, empleando el sistema experto propuesto en esta investigación.

1.4 Justificación.

En la actualidad la industria cuenta con infraestructura como, túneles, edificios, sistemas de generación de energía eléctrica, parques industriales y sistemas de transporte. Esta infraestructura envejece o sufre de acciones extraordinarias como sismos que pueden ocasionarle daños estructurales, reduciendo su operación y seguridad. Estos daños podrían afectar la integridad física de seres humanos e incrementar los costos de mantenimiento de la infraestructura.

Por tanto, es necesario la realización de estudios en la infraestructura; nuestro estudio se enfoca en tuberías de material ferromagnético, en donde los defectos o heterogeneidades son producidos durante sus procesos de fabricación, cargas mecánicas estáticas o cíclicas, corrosión o al incrementarse los esfuerzos en las estructuras, dando origen a la propagación de fisuras causando daños severos a las tuberías esto afecta su operación y seguridad.

En cuanto a la industria las principales fallas críticas de los equipos se dan en las zonas de concentración de tensión (ZCS por sus siglas en inglés) por la exposición de cargas de trabajo producidas en zonas específicas en combinación por algunos defectos del proceso de fabricación. Como regla general, las estructuras de acero que trabajan bajo cargas adicionales están sujetos a cambios en su estructura.

Así, para incrementar la seguridad y tiempo de operación de la infraestructura se deben realizar estudios de su salud estructural empleando diferentes sensores en combinación con sus sistemas de procesamiento y transmisión de señales. Estos sensores pueden utilizar el método de memoria magnética para detectar grietas e imperfecciones geométricas en estructuras ferromagnéticas. Para esto, es clave el desarrollo de modelos analíticos y numéricos que relacionen la distorsión del campo magnético con el tipo de defecto geométrico en estructuras ferromagnéticas.

1.5 Hipótesis.

El monitoreo de grietas por medio del método de memoria magnética metálica (MMM) es un método de prueba avanzado y no destructivo basado en efectos magneto-mecánicos. Esta técnica puede ser usada para evaluar defectos por medio de señales MMMS.

El defecto geométrico está relacionado con la variación de campo magnético, gracias a estas variaciones se puede predecir la forma del tipo de defecto. La forma y tamaño de la grieta magnitud está relacionado con la amplitud, dimensiones de las variables y la forma de las variables-resistivo.

El campo magnético de la tierra y cargas magnéticas, así como los campos magnéticos de fuga generan en las zonas de concentración esfuerzos donde la componente tangencial HP(z) y la componente normal HP(y) alcanzan el máximo.

Para este problema se plantea encontrar la relación entre el modelado analítico y numérico de la variación del campo magnético de defectos geométricos en tuberías ferromagnéticas y el sistema mecánico de monitoreo de la adquisición de la señal del campo magnético previamente determinados, esto es, desarrollar un sistema experto para el modelado y monitoreo de grietas en tuberías ferromagnéticas usando el método de memoria magnética metálica.

1.6 Contribuciones

Se sabe que el desarrollo de herramientas brinda la oportunidad de realizar cualquier investigación con mayor sensibilidad o precisión en comparación con los resultados existentes, es una regla, para grandes logros de la ciencia y la tecnología. Cuando logramos crear herramientas con cualidades especiales, principalmente nuevas, proporcionando la posibilidad de un registro confiable de los cambios en los procesos físicos que antes eran difíciles de alcanzar, es decir, permitir poder llevar a la práctica herramientas con capacidades de rendimiento completamente diferentes, siempre nos conduce a descubrimientos que representan el avance en las áreas más importantes de nuestro conocimiento natural.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Descripción del Método de Memoria Magnética Metálica.

El uso del método de Memoria Magnética Metálica permite detectar alteraciones del campo magnético natural de estructuras ferromagnéticas causadas por zonas de concentración de esfuerzos residuales o discontinuidades geométricas como fisuras y cambios de espesor (Dubov & Kolokolnikov, 2014) y (Chen & Liu, 2014)Estos esfuerzos se concentran alrededor de defectos o heterogeneidades en los materiales ferromagnéticos, producidos durante sus procesos de fabricación o como consecuencia de la aplicación de cargas mecánicas. Las cargas mecánicas estáticas o cíclicas y la corrosión pueden provocar la propagación de fisuras y el incremento de los esfuerzos en las estructuras ferromagnéticas, causando daños severos que afectan su operación y seguridad. El método de memoria magnética metálica puede detectar estos defectos en tiempo real y antes que provoquen un daño crítico.

Los métodos y herramientas, utilizados en los años 70-80 en el Instituto de Metales Física (Sverdlovsk), el Instituto de Física Aplicada (Minsk), F. Ferster Institute (Alemania) y otros Centros de Investigación, estaban dirigidos a la medición de residuos magnetización de productos después de su premagnetización (y en muchos casos después con mayor magnetización preliminar). Magnetización natural de productos (o memoria magnética metálica) utilizados en el método de la memoria magnética metálica no era estudió como tal y fue tomado como una interferencia en las mediciones.

Esta técnica puede usarse para evaluar defectos basados en MMM señales (MMMS). Sin embargo, si se comprende el impacto de la profundidad de la grieta, la carga y tratamiento térmico en las variaciones de campo magnético residual (estas a su vez pueden afectar la evaluación de defectos) aún no se ha establecido en la literatura. MMM se ha utilizado para monitorear el desarrollo de daños en tubos

de acero y juntas soldadas, y la distribución de flujo auto-magnético (SMFL) basado en la teoría de las cargas magnéticas.

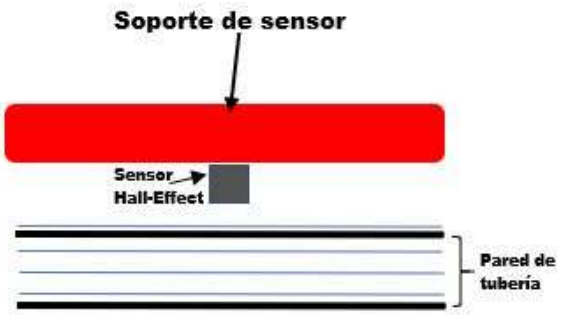


Figura 2.1. Perturbación magnética natural.

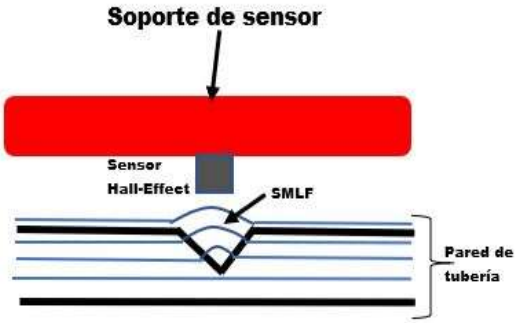


Figura 2.2. Perturbación magnética con defecto en el tubo ferromagnético.

Figura 2.1 se muestra el campo magnético natural sobre la pared del tubo, sin embargo, las características básicas del método MMM es que se basa en el uso del propio campo de fuga magnética (SMLF) que surge en productos ferromagnéticos y paramagnético con acumulaciones de dislocaciones de alta densidad como se muestra en la Figura 2.2. Así como el efecto subyacente de MMM, que tiene lugar en la fabricación de productos durante la formación de tensiones internas y cuando está en operación debido a la acción de cargas de trabajo.

Dicha información se forma y se puede obtener solo en un pequeño campo externo como el campo magnético de la tierra, cuando se empieza a construir hay una deformación del campo magnético. En reciente años, el método de MMM ha recibido gran atención en ingeniería debido a su facilidad de uso, tiempo de análisis corto y configuración. Como un nuevo método de prueba magnética el método de MMM ha demostrado ser eficaz en la caracterización de las concentraciones de tensión y defectos en materiales ferromagnéticos. Bajo los efectos del campo de tierra y cargas mecánicas.

El principio básico para MMM se puede expresar como la magneto estricción, ambos, bajo la carga aplicada y el campo magnético terrestre existente, la dirección y reorientación irreversible del dominio magnético tendrán lugar alrededor de las

concentraciones de los materiales ferromagnéticos. Dado que se sabe que la señal MMM se ve afectada por muchos factores complicados debido a una señal magnética muy débil y también por estrés, numerosas investigaciones experimentales, incluyendo estática y pruebas de fatiga.

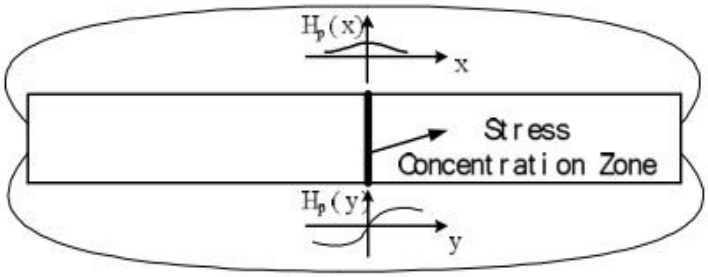


Figura 2.3. Principio del método MMM.

Cuando hay un defecto de tubería, se genera el campo magnético del defecto en la Figura 2.3 se muestran las distribuciones vectoriales de cada componente, para cada componente se relaciona de acuerdo con la posición en la que es colocado el sensor magnético. El eje vertical Y representa el ancho del defecto como se muestra en la Figura 2.4; y el eje horizontal representa la intensidad de la inducción magnética.

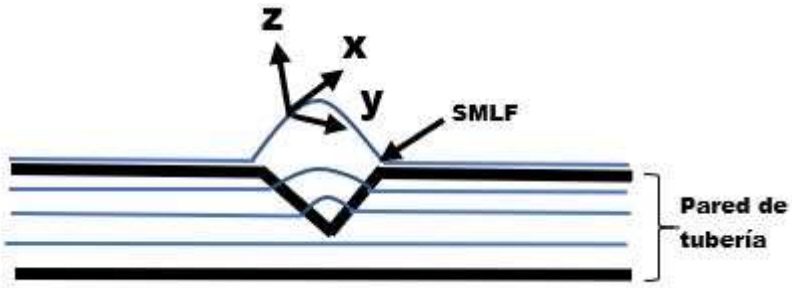


Figura 2.4. Fuga de campo magnético en defecto.

La singularidad del método de memoria magnética metálica es que se basa en el uso del campo magnético de dispersión (SMF). La magnetización no uniforme en regiones en donde los patrones de dislocación son constantes, provocadas durante

el deslizamiento en el tubo por esfuerzos locales inducidos por la acción de la carga de trabajo.

Para el estudio del método de la memoria magnética metálica (MMM) es necesario estudiar algunos conceptos de manera que, al realizar el desarrollo del tema, obtengamos los resultados de nuestra experimentación y las conclusiones, podamos entender los fundamentos básicos más importantes sobre este tema.

2.2 Dispersión del campo magnético de fuga (SMFL).

Es el campo magnético de dispersión medible en una superficie de productos y uniones soldadas.

El campo de dispersión en la superficie del cuerpo magnético parece ser imposible obtener información sobre SMF, pero dicha información se puede obtener con un campo externo pequeño, como el campo magnético de la tierra. Hay una relación entre la tensión elástica y la densidad del campo magnético inducido. El efecto medible sobre SMF es mayor cuando la densidad de energía magnética producida por las tenciones locales en los patrones de las grietas es al menos del mismo orden de magnitud que la densidad de la energía magnética de la mayor parte del material. La utilización de la técnica de MMM se puede utilizar durante la operación de equipos después de estar en operación. Por tanto, se pueden hacer evaluaciones del estado real de las tuberías para evaluar zonas de daño tempranas en el metal mediante la medición de SMF (Suárez-Ántola & Suárez-Bagnasco, 2014). SMFL representan la magnetización residual de las grietas en un tubo realizadas con ciertas medidas en específico.

2.3 Zona de concentración de estrés (SCZ).

Se caracteriza por un cambio abrupto de valor de magnetización ΔM en relación con una razón matricial $M0$. Se forma en áreas de concentración de defectos de metal e impurezas cuando una unión soldada se enfría por debajo del punto de temperatura de Curie del material en el campo magnético de la tierra.

Es el contorno sobre la superficie de una tubería, limitado por una línea de cambios de signos en la componente normal de la Señal de campo magnético. La zona de

concentración de estrés (por sus siglas en ingles SCZ), se caracteriza por un cambio de valor abrupto del valor de la magnetización relativo M a una magnetización de matriz. Los defectos se forman en áreas de concentraciones de defectos de metal e impurezas cuando una junta soldada se enfría por debajo del punto de temperatura de Curie del material con respecto al campo magnético de la tierra.

2.4 Fundamentos del método: Principios físicos básicos.

El ferromagnetismo está relacionado con las fuerzas de intercambio que mantienen a los átomos en su lugar en la red metálica. En ciertos metales como el hierro, níquel, el cobalto, y las aleaciones presentan energías de intercambio, así las diferentes energías de magnetización organizan estos átomos en grupos microscópicos llamados dominios. Dentro de cada dominio, la magnetización está saturada, es decir, los espines de los electrones internos magnéticamente están alineados (Kittel, 1990).

Antes de la magnetización, las direcciones de los dominios individuales se distribuyen aleatoriamente. Cuando se aplica un campo magnético externo ocurren dos cosas. El primer proceso es el crecimiento; por desplazamiento de frontera, en los cuales los dominios son favorablemente orientados con respecto a los campos. El segundo proceso predomina las intensidades de campo magnético, la rotación de la dirección de magnetización en la dirección del campo aplicado. Estos procesos explican la forma de la familia no lineal de la curva de histéresis de un material.

En el año de 1864, E. Villari observó que las cargas mecánicas alteran las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos. Se sabe que los efectos magnéticos de las tenciones internas o aplicadas están estrechamente relacionados con el conocido fenómeno de la magnetoestricción descubierto por Joule en 1847. Para una aproximación histórica a la magneto estricción y los efectos magneto elásticos, vea (Hunt , 1954). La magno estricción es el cambio de dimensiones de los materiales ferromagnéticos tras la magnetización.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial H} = \frac{\partial B}{\partial \delta}$$ Ecuación 2.1

(Ambos derivados parciales tomados a temperatura y presión constantes) como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$\lambda = \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \qquad \text{Ecuación 2.2}$$

Esta ecuación nos muestra que cuando λs es positiva, por ejemplo, en el hierro y permaloy, B incrementará con la tensión de estrés aplicado par aun valor de H fijo. Cuando λs es negativo, como lo es en el níquel, B tiende a decrecer. Este es el rango de campos y tensiones aplicadas dentro de los límites de dominio que aún pueden regresar a su posición cuando se libera el campo o la tensión. Cualquier respuesta magnética del material a las fuerzas y campos aplicados se debe invariablemente a un reajuste del tamaño y la orientación de los dominios, de modo que su energía sea mínima en las condiciones aplicadas (Landau & Lifchitz, 1969).

$$B = \mu_0 H + M \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

$$\frac{\partial B}{\partial \sigma} = \frac{\partial M}{\partial \sigma} \qquad \text{Ecuación 2.4}$$

Si λs es positivo y la tensión de tensión aplicada, entonces los dominios tenderán a alinearse con la dirección de la tensión. Sin embargo, si λs es negativo, los dominios se orientarán más perpendicularmente al estrés. Mientras tanto, el campo magnético aplicado intenta alinear los dominios en la dirección del campo. Si esta dirección difiere de la orientación del estrés del dominio, habrá una competencia entre ellos. Un tercer efecto que opera en los dominios es la anisotropía de cristal, que tiende a alinear los dominios a lo largo de ciertos ejes cristalográficos preferenciales.

La Ecuación 2.3 juntamente con la Ecuación 2.2 muestra que la variación local en las tensiones produce una variación local en la magnetización.

2.5 Campos magnéticos de dispersión.

De la Ecuación 2.1 y la Ecuación 2.3 se deduce que λs mide la sensibilidad de la magnetización M a una variación de la tención local σ. Para ver la utilización de estos campos para fines de pruebas no destructivas NTD, vamos a suponer que el material se encuentra en un campo magnético externo relativamente débil, como el campo magnético de la tierra. Supongamos que la temperatura está por encima del Curie. Entonces cuando empieza la temperatura a descender por debajo del Curie, entonces es cuando emerge una magnetización microscópica producida por el campo externo y debido a la estructura del dominio mencionada anteriormente. Entonces de acuerdo con la Ecuación 2.2, la Ecuación 2.3 magnética B varia, si tal variación es lo suficientemente grande, puede medirse y la inducción medida puede relacionarse con la presencia de defectos significativos en el material ferromagnético. Las variaciones espaciales de la magnetización debida a tensiones internas o aplicadas producen variaciones espaciales correspondientes en el llamado campo magnético de dispersión. Este campo es el campo magnético de fuga en el aire que rodea el cuerpo magnetizado.

Debido a la restricción $\Delta \bullet \vec{B}$=0 una variación de la componente tangencial $\vec{B}$ debe ser compensada por una igual y de variación opuesta en su componente normal. Pero la componente normal en $\vec{B}$ en el material es igual a la componente normal de $\vec{B}$en el aire.

Por lo tanto, si la magnetización del cuerpo varia de un punto a otro, paralelo a la interface, el campo magnético de la normal en el aire $\vec{H}$=(1/μ) $\vec{B}$ donde sufre una variación. Esta variación puede ser medida por el desplazamiento de un magnetómetro sobre la interfaz obteniendo el gradiente de campo magnético disperso correspondiente. Esta es la base física del método de memoria magnética para pruebas no destructivas de materiales (Vlasov, 2003).

Para obtener los campos, asumimos que el tubo ferromagnético está uniformemente magnetizado con el vector $\vec{M}$ con el campo externo $\vec{H}$ debido a la tierra. El vector de

magnetización $\vec{M}_0$ es totalmente paralelo al eje del tubo. Si se desplaza de manera radial del tubo, se puede captar la medición de un campo magnético. Con estas mediciones se pudo obtener el campo magnético de diferentes tipos de grietas mostrado, en las figuras se muestra las gráficas obtenidas para los ejes *y* y *z*.

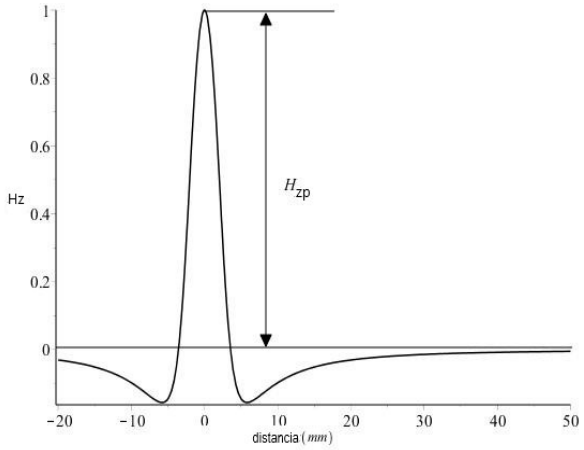


Figura 2.5. Grieta tipo "V" componente tangencial en Hz.

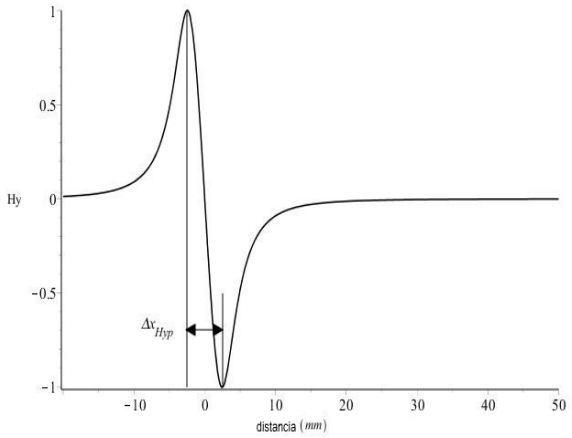


Figura 2.6. Grieta tipo "V" de la componente normal en Hy.

Los campos producidos son significativos de acuerdo a la Figura 2.5 en la componente tangencial y en la Figura 2.6 se muestra el campo en la componente normal. Se toman las mediciones en cada grieta con medidas de profundidad diferente. Al realizar las mediciones se obtienen datos del campo magnético que se mide muy cerca de la superficie del defecto. Si se realiza un escaneo al tubo el origen de $\vec{M}$ puede ser originado por varias situaciones una de ellas es fabricación del tubo ferromagnético. Como dijo (Dubov & Kolokolnikov, 2014) "la magnetización natural en la fabricación de productos de construcción de maquinaria se forma, por regla general, exactamente en tales condiciones. El mecanismo de formación de la textura magnética real del producto (fusión, forja, tratamiento térmico, soldadura) ocurre directamente después de la cristalización en el enfriamiento por debajo del punto de Curie.

Aquí el proceso de enfriamiento es, por regla general, no uniforme. Las capas externas de metal se enfrían más rápido que las internas. Las tensiones térmicas

se forman a través del volumen del producto. Se forman con la celosía y la textura magnética adecuada. Aparecen principalmente en áreas de la mayor concentración de defectos de red (es decir, grupos de dislocaciones) y de no uniformidad estructural ".

Los límites de los dominios (Domain boundaries, DB) adjuntan y se produce una fuerte magnetización local que supera la magnetización de matriz promedio. El campo magnético así producido emerge en la superficie del material y da una fuerte señal de SMF cuando se mide como se explicó anteriormente.

2.5.1 Intensidad de dispersión del campo magnético (Hp[A/m]).

Intensidad del campo magnético de dispersión es una de las características (parámetros) de la intensidad del campo magnético medida en la superficie de una soldadura o defecto.

2.5.2 Discretización de la medición del campo (Hp).

Pasos para escanear por medio de un transductor de flujo de compuerta o la distancia entre dos puntos adyacentes de una medida de inspección por cada canal de medición.

Se estableció en investigaciones industriales que la magnetización natural, formada de tal manera, refleja la herencia estructural y tecnológica del producto, y como se mencionó anteriormente, las líneas donde el campo cambia su signo corresponden a las líneas de concentración de tensiones residuales.

El método MMM se puede aplicar para escanear, dependiendo del tamaño, cerca del 100% de una pieza. Puede detectar zonas de concentración de tensión y tensión que no pueden ser detectadas por otros métodos de NDT. Se puede usar para seguir la evolución de estas zonas y se puede usar para propósitos predictivos. Se puede combinar con métodos más tradicionales de NDT para estudiar más a fondo las zonas problemáticas detectadas midiendo los campos magnéticos de dispersión

en la superficie de los materiales (Suarez Antola, Vedovatti, & Zirnhelt, August 2014).

2.6 Modelo de Dipolo magnético: ecuaciones de Maxwell.

En la literatura se habla de magnetismo en donde es posible encontrar que existe una correlación entre la densidad de flujo magnético y la intensidad del campo magnético. Además, B será equivalente al producto de H y la permeabilidad magnética que presenta la siguiente Ecuación 2.5.

$$B = \mu_0 H \qquad \text{Ecuación 2.5}$$

Esta primera ecuación viene de la ley de Gauss.

$$\nabla \cdot B = 0 \qquad \text{Ecuación 2.6}$$

La segunda ecuación viene de la ley de ampere.

La segunda ecuación de Maxwell proviene de la ley de Ampere, que también contempla las corrientes libres representadas en J en el sistema de medición. Sin embrago, la técnica de inspección de MFL no considera corrientes libres en el sistema. Como resultado la Ecuación 2.7 de Maxwell, se convertirá en la Ecuación 2.8.

$$\nabla \cdot H = \mathrm{J} \qquad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\nabla \cdot H = 0 \qquad \text{Ecuación 2.8}$$

Una vez que se tienen las ecuaciones de Maxwell, supongamos que un material ferromagnético es expuesto a un campo magnético. La relación entre la densidad del campo magnético y la intensidad del campo magnético será modificada. Por lo tanto, la magnetización general de M será representada en a la siguiente Ecuación 2.9.

$$B = \mu_0 (M + H) \qquad \text{Ecuación 2.9}$$

La solución general de H (intensidad del campo magnético) se puede representar como energía potencial. Por lo tanto, la solución general de H se puede expresar como el gradiente de un potencial escalar v(r) como la Ecuación 2.6. Además,

podemos decir que con las ecuaciones anteriores es posible calcular el potencial magnético dentro y fuera de un material ferromagnético.

$$H = -\nabla V \qquad \text{Ecuación 2.10}$$

Por ejemplo, para calcular el potencial magnético que fluye dentro del material ferromagnético, la Ecuación 2.10 se sustituye en la Ecuación 2.9 y el resultado se utiliza para reemplazar B en la Ecuación 2.5 que proporciona una relación directa ∇H y ∇M (ecuación 2.11). Por lo tanto, $B = \mu_0(M + (-\nabla V))$, y $\nabla \cdot \left(\mu_0\left(M + (-\nabla V)\right)\right) = 0$ producto.

$$\nabla^2 V_{interno} = \nabla M \qquad \text{Ecuación 2.11}$$

De manera similar, para calcular el potencial magnético fuera del material, la Ecuación 2.10 será sustituido en la Ecuación 2.5 y el resultado se utilizará para reemplazar B en la Ecuación 2.6. El resultado resulta ser $\nabla^2 V_{interno} = 0$, porque no habrá magnetización fuera del material. Con los resultados anteriores es posible demostrar que el potencial magnético escalar en cualquier vector r puede escribirse como Ecuación 2.12. La siguiente ecuación presenta la adición del campo magnético externo aplicado representado por $Va(r)$ y la magnetización del material ferromagnético representado por $Vd(r)$.

$$V(r) = Va(r) + Vd(r) \qquad \text{Ecuación 2.12}$$

donde Vd está compuesto por 2 integrales, la primera ecuación representa el potencial magnético del volumen del material ferromagnético y la otra ecuación representa el potencial magnético escalar en la superficie del defecto ferromagnético. La Ecuación 2.13 presenta la primera integral mencionada:

$$V_d(r) = \frac{1}{2\pi}\int_{\forall} \frac{-\nabla \cdot M(s)}{|r-s|} d\forall, \qquad \text{Ecuación 2.13}$$

donde r representa la ubicación de P y s la ubicación del elemento del defecto en la inspección de tuberías MFL, se supone que la permeabilidad magnética de los elementos del ferromagneto que están cerca del defecto es constante; Bozorth y

Chapin discutieron más sobre este supuesto (Bozorth & Chapin, 1942). Como resultado, el vector de magnetización produce la siguiente restricción:

$$\nabla \cdot M(s) = 0, \qquad \text{Ecuación 2.14}$$

Por lo tanto, la primera ecuación Vd(r) desaparecerá. Para eso, solo será compuesto de la segunda integral que dará la siguiente Ecuación 2.15.

$$V_d(r) = \frac{1}{2\pi}\int_S \frac{n(s)\cdot M(s)}{|r-s|}\,ds, \qquad \text{Ecuación 2.15}$$

donde n representa el vector normal unitario que sale de la superficie del defecto y r - s representa la distancia entre un punto dado de la pared del defecto interior y el punto P.

$$V_d(r) = -1/2\pi\int \frac{n(s)M(s)\hat{j}\cdot(r-s)}{|r-s|^3}\,ds(s), \qquad \text{Ecuación 2.16}$$

donde M - $M\hat{j}$, que no es más que la magnetización del material expresado en términos de un vector. Ahora, consideremos dp la carga magnética del elemento de superficie ds que mantiene la siguiente relación introducida por (Dutta, 2008).

$$dp(s) = Mn(s)\cdot\hat{j}ds(s) = M\sin(\theta)ds, \qquad \text{Ecuación 2.17}$$

donde θ para un análisis de defectos asimétricos en 2D será de 90 grados. Por lo tanto, la variación de intensidad del campo magnético producida por un ferromagneto defectuoso se puede calcular de la siguiente manera:

$$H = -\frac{M}{2\pi}\int_S \frac{(r-s)}{|r-s|^3}\,ds(s), \qquad \text{Ecuación 2.18}$$

Otra consideración utilizada para la derivación del MDM, es con referencia a la forma del defecto. De acuerdo con la teoría de (Maxwell, 1891), la forma del defecto debe ser de aproximadamente un polinomio de segundo grado. Maxwell presentó el comportamiento del campo magnético en relación con la forma del defecto. Demostró que, para la forma del defecto polinómico de segundo grado, el comportamiento del campo magnético permanece constante dentro de la cavidad del defecto, mientras que, para otras formas, el campo magnético será variable

dentro de la cavidad del defecto. La presencia de un campo magnético variable dentro de la cavidad de un defecto se reflejará en la magnitud de magnetización con que cada elemento del defecto contribuirá a un punto determinado P. Otro punto que debe considerarse es cómo la variación del campo magnético dentro de la cavidad del defecto resultará en la presentación de una permeabilidad magnética variable para el material de cada elemento del defecto. La variación de la permeabilidad magnética de cada elemento puede ser determinada por:

$$(\mu - 1)H = M, \qquad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde μ es la permeabilidad magnética. Además, se mostró en (Maxwell, 1891) que una forma del defecto elipsoidal se aproxima a un polinomio de segundo grado. Por lo tanto, la forma del defecto propuesta por Dutta para el MDM también debería aproximarse a una cavidad elipsoidal.

2.7 Modelo del dipolo magnético: contribuciones de MFL.

Esta sección se explicará como las cargas magnéticas producido por un campo magnético sobre un defecto ferromagnético contribuyen a un punto P localizado en el espacio libre. De igual forma, en esta sección se agregará como las cargas magnéticas en el interior de las paredes del defecto ferromagnético y su localización con referencia a un punto P el cual contribuirá y definirá las magnitudes y componentes de la señal MFL. La Figura 2.7 ilustra la vista lateral del defecto “V” en la superficie del tubo ferromagnético expuesto a un campo magnético constante dado por una fuente constante. Se deja que *j* y *k* sean considerados los vectores unitarios del sistema de coordenadas cartesianas como se muestra la Figura 2.8. De igual forma, se permite que en la superficie del material sin defectos *y=0* y en el punto medio entre las paredes del defecto sea *k=0.* Los campos magnéticos viajan de norte a sur y las dimensiones del defecto en este punto se supone que son pequeños comparadas con el radio del tubo ferromagnético. Además de la descripción y las dimensiones de los defectos analizados se darán a continuación.

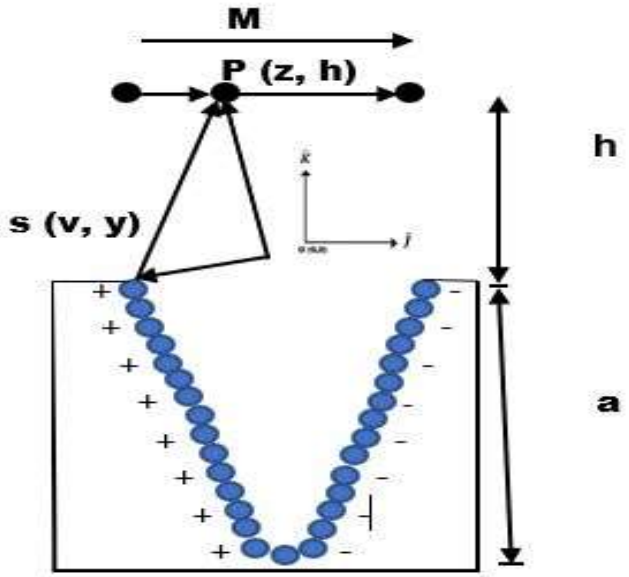


Figura 2.7. Componentes 2D del defecto tipo “V” hacia el punto P.

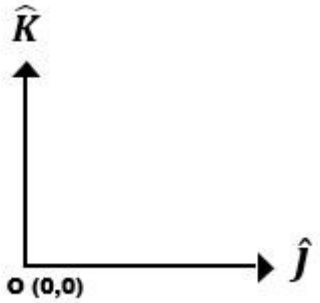


Figura 2.8. Plano del punto de origen del sistema.

Después de la explicación sobre como los elementos del defecto contribuyen a las señales de MFL, la siguiente Tabla 1 se presenta un conjunto de variables y sus definiciones.

Tabla 2.1. Definición de variables.

Variable	**Definición.**
O	Coordenadas de origen del sistema.
P	Un punto dado en el espacio.
r	Una localización del punto P.
$\hat{r}$	Un vector dado desde el origen hacia un punto dado P.
y	Coordenada Axial. (Horizontal)
z	Coordenada Radial. (Vertical)
h	Lift-off. Localización vertical del punto P.
s	Dado un punto localizado sobre la superficie del defecto.
$\hat{s}$	Un vector desde un punto dado sobre la superficie del defecto hacia el origen.
v	Coordenada Axial del punto de carga de la superficie.
$\vec{q}$	La diferencia de la distancia entre un elemento de la superficie del defecto y el punto P. ($\lvert r - s \rvert$)
M	Magnetización.
a	Profundidad del defecto.
b	La mitad de la longitud del defecto.

El modelo del dipolo magnético se deriva del primer principio de las ecuaciones de Maxwell que aseguró que los elementos no serán cargados en superficies que forman una perpendicular con el vector de la normal hacia la dirección de magnetización. Sin embargo, la derivación de las ecuaciones de Maxwell se entiende en la siguiente distribución: los elementos son cargados a lo largo de la superficie del defecto si los elementos del vector de la normal no forman un ángulo de 90 grados con la dirección de la magnetización (aplicación de campo magnético externo).

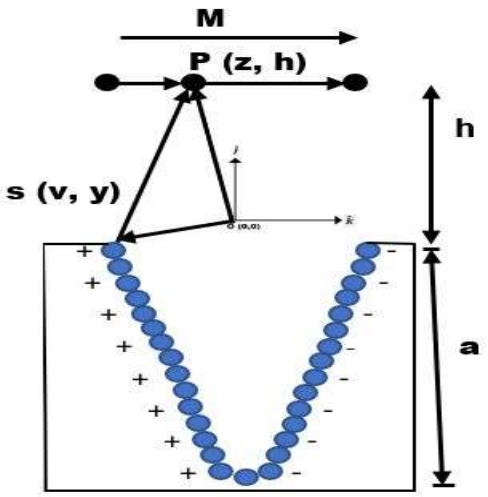


Figura 2.9. Identificación de variables defecto tipo “V”.

La carga de cada elemento magnético será definida por la dirección de los vectores en la normal. Si la dirección favorece la magnetización, los elementos presentarán una carga positiva mientras que los elementos con un vector normal de dirección opuesta a la dirección de la magnetización presentarán una carga negativa.

Así, la Figura 2.9 muestra como en los defectos de la superficie, donde se localizan los vectores de la normal son paralelos a la dirección de la magnetización presentando carga. Teniendo identificados la dirección de los elementos de los defectos y como se definen las cargas de los elementos, esto es posible para dirigir cómo se comportarán la carga de los elementos. Se reescribe la ecuación de la siguiente forma usando la siguiente notación.

$$H = \frac{M}{2\pi}\int_{s}\frac{q\hat{j} + q\hat{k}}{q^3}\,dS, \qquad \text{Ecuación 2.20}$$

El término $|r - s|$ el cual representa la distancia entre un elemento del defecto y el punto P es sustituido por q. Así mismo, el numerador es separado por los componentes porque la Ecuación 2.18 solo puede ser separada por componentes. De manera similar, esta Ecuación 2.20 puede ser expresada en las coordenadas del sistema.

$$H(z) = \frac{M}{2\pi} \int_{-b} \frac{(z-v)\hat{j} + (h-y)\hat{k}}{((z-v)^2 + \ (h-y)^2)^{\frac{3}{2}}} dS, \qquad \text{Ecuación 2.21}$$

Por lo cual podemos llegar a la conclusión de que al calcular la componente axial desde un elemento de carga que será dado por la distancia axial entre el elemento y un punto P divido por la magnitud de la distancia entre elemento y el punto P elevado a la tercera potencia. De manera similar, se aplica para calcular la componente radial donde un elemento de carga dado por la distancia radial entre el elemento y un punto P dividido por la magnitud de la distancia entre el elemento y le punto P elevado a la tercera potencia.

Por ejemplo, si la distancia horizontal (axial) y la distancia vertical (radial) entre un elemento y el “P” son divididos por el resultante elevado a la tercera potencia, y estos valores multiplicados por la magnetización del elemento sobre 2π representando la componente axial y radial desde el elemento particular hasta el punto P deseado.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Este capítulo presenta un análisis de validación del modelado de MMM. Este estudio mejorado nos muestra un escaneo de línea SMFL lo largo de una línea recta, paralela a la superficie ferromagnética. Ambos modelos se utilizaron para analizar diferentes formas de defectos y sus resultados. Además, este capítulo también presenta diferentes resultados experimentales de escaneo de superficie donde podemos definir que un escaneo de superficie representa un conjunto de puntos medidos por SMFL en un área definida (sobre el defecto). El escaneo de la superficie se puede obtener con un solo sensor Hall moviéndose a lo largo de una superficie 2D a través del defecto.

Se utilizo un sistema equipado con motores a paso NEMA-17 para el manejo de la rotación de los tubos ferromagnéticos, los cuales tienen las diferentes grietas con profundidades diferentes. Así como también cuanta con un mecanismo de movimiento axial (horizontal), este mecanismo cuanta con un sensor tipo Hall MAG3110 para el escaneo. Los escaneos de superficie de SMFL rara vez se encuentran en la literatura, por lo que realizar este tipo medición experimental es una tarea desafiante. Este trabajo presenta escaneos de superficie para diferentes formas de defectos con una variedad de parámetros tales como diámetros, profundidades, longitudes. Los resultados obtenidos de estas mediciones experimentales son de hechos de una manera sistemática estricta, pues tienen una gran relevancia para el estudio de los fundamentos de la técnica SMFL. Claramente, la medición de un área 2-D sobre un defecto es muy ventajosa. Por ejemplo, la forma de defecto 2-D en la superficie de la tubería se puede determinar con precisión a través de la señal SMFL en lugar de usar diferentes técnicas de predicción que tienen un cierto nivel de error. Por lo tanto, el escaneo de superficies representa una herramienta muy poderosa para entender mejor la física de la técnica SMFL. Este capítulo presenta un estudio de validación 2-D entre exploraciones de superficie experimentales y simulaciones.

En esta sección, se presentan los resultados experimentales y de simulación realizados con el sistema de detección de grietas en tuberías ferromagnéticas que se muestra en la Figura 3.1. La finalidad de este sistema es para validar el modelo analítico propuesto del Capítulo 2.

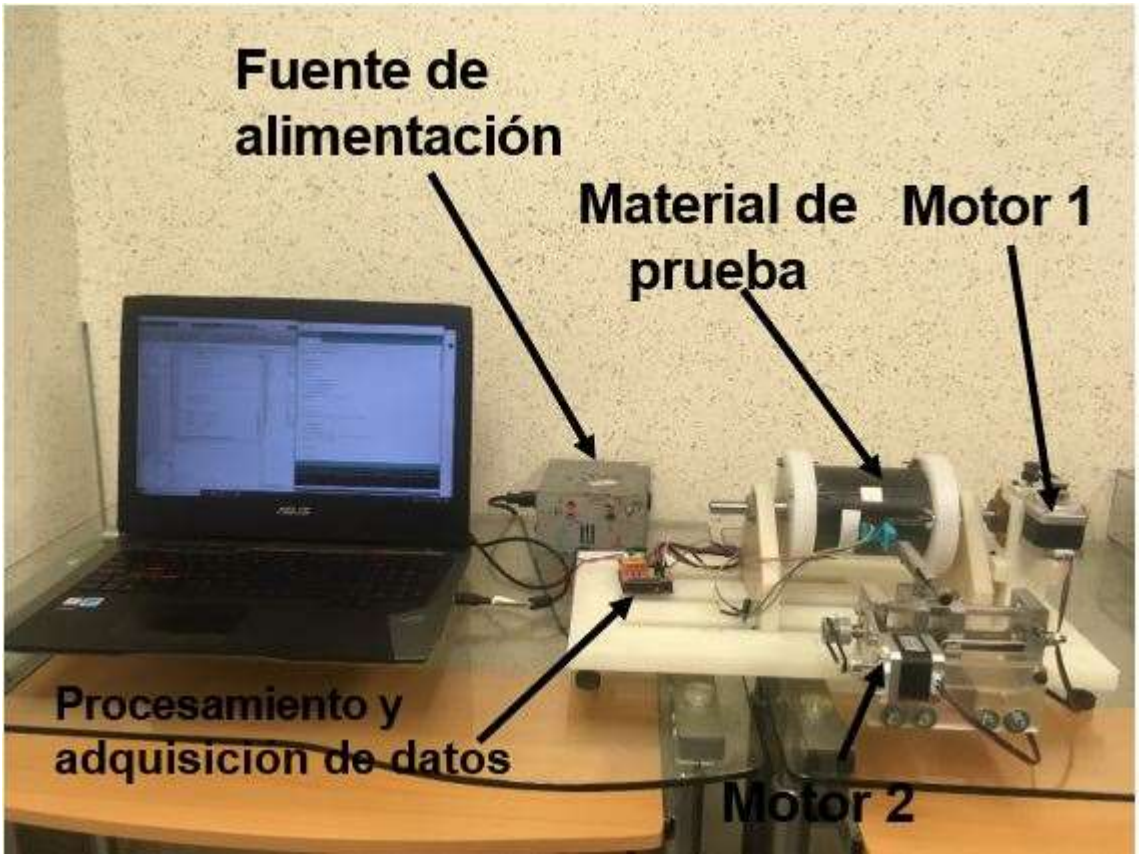


Figura 3.1. Sistema de detección de grietas en tuberías ferromagnéticas.

Se presenta el defecto en tipo V en donde se identifican los defectos mediante las gráficas que se obtuvieron después de realizar la medición. Los resultados deben coincidir con lo obtenido en la medición ya que el campo coincide de forma ortogonal con respecto al campo magnético. Los vectores normales de las paredes defectuosas están siempre contenidos en los ejes *y* y *z*.

3.1 Reconocimiento de Patrones.

La ciencia que se ocupa de los procesos sobre ingeniería, computación y matemáticas relacionados con objetos físicos y/o abstractos, con el propósito de

extraer información que permita establecer propiedades de o entre los conjuntos de dichos objetos, los cuales nos permitan interpretar el mundo que nos rodea.

3.2 Defectos geométricos.

Durante el proceso de fabricación, aplicación de cargas mecánicas, exposición a severas condiciones de trabajo y la corrosión pueden provocar alteraciones del campo magnético natural de estructuras ferromagnéticas causadas por zonas de concentración de esfuerzos residuales o discontinuidades geométricas como fisuras, grietas y cambios de espesor. La propagación de fisuras, grietas y el incremento de los esfuerzos en las estructuras ferromagnéticas causan daños severos que afectan su operación y seguridad. Estas discontinuidades geométricas pueden ser rectangulares, triangulares, elipsoide, circulares, etc. (Villegas Saucillo, Diaz Carmona, & Herrera May, 2016).

La exploración de superficie es un concepto relativamente nuevo en el campo de la técnica de inspección MFL. De hecho, existen muy pocas referencias en la literatura que contienen datos experimentales o de campo para el escaneo de superficies. Las formas que se analizaron fueron defecto tipo V, también llamada muesca y defecto elíptico. Cada defecto fue mecanizado en una tubería ferromagnética ASTM-A-36 como se muestra en las Figuras 3.2 y Figura 3.3. Las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los parámetros geométricos de las formas de defecto, la elevación y la distancia experimental (lift-off) que representa la distancia axial entre el sensor y el defecto que se encuentra en la superficie del tubo ferromagnético (el sensor está localizado en el eje z). Estos datos son necesarios para analizar las formas de defecto tipo “V” y semi elípticos, respectivamente.

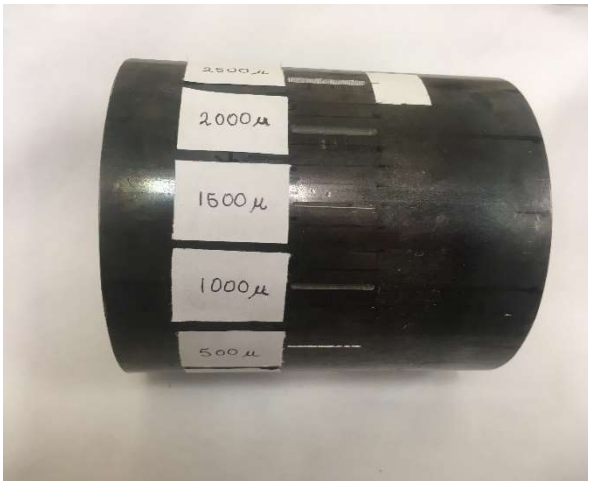


Figura 3.2. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V”.

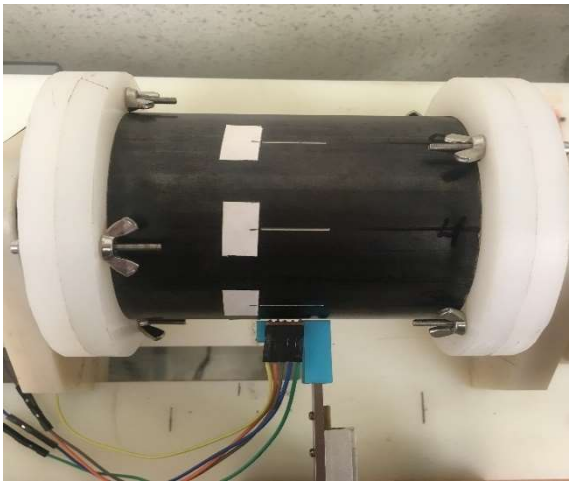


Figura 3.3. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo semi elípticos.

Las Figuras 3.4 y Figura 3.5 representan las componentes de SMFL obtenidos por el sensor tipo Hall MAG3110. Las mediciones y los resultados normalizados de las simulaciones correspondientes a los defectos tipo “V”.

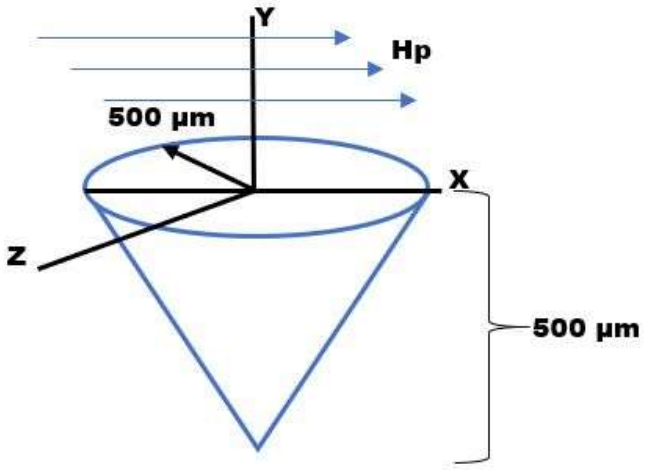


Figura 3.4. Defecto tipo “V” llamado tipo muesca.

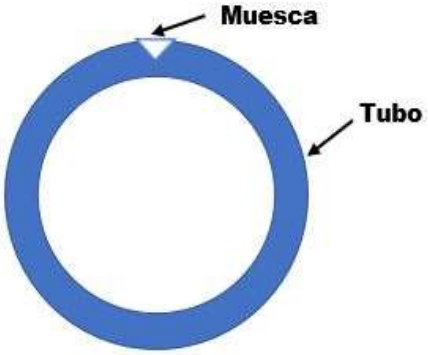


Figura 3.5. Vista frontal de tubo ferromagnético con defecto tipo “V” llamado también muesca.

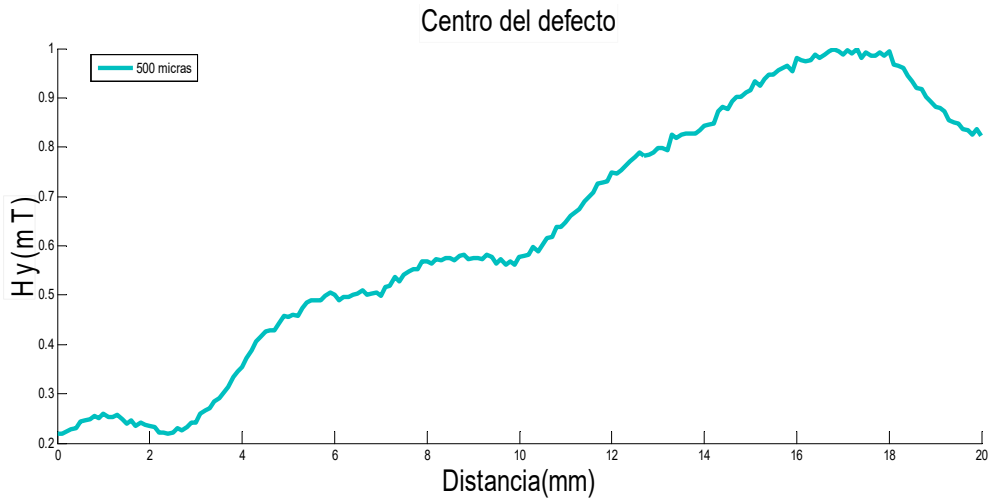
Las figuras que se muestran a continuación representan las gráficas de señales radiales, axiales y tangenciales de SMFL respectivamente. Las señales se extrajeron de un escaneo lineal en la dirección y a lo largo de la trayectoria central del defecto (x = 0), y las señales se normalizaron con respecto a los valores radiales máximos de SMFL obtenidos de cada modelo.

3.3 Descripción de Señales MFL.

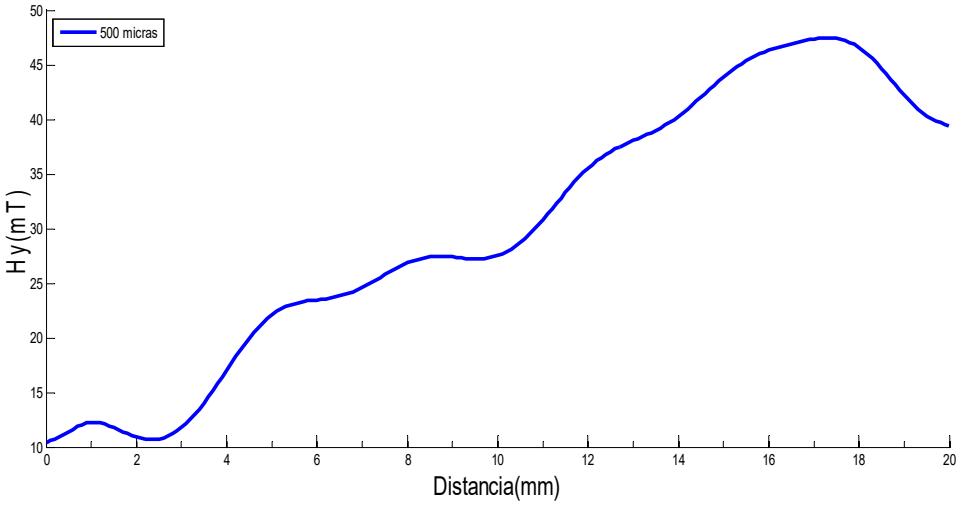
Esta sección presenta el análisis de las diferentes geometrías de defectos para abordar las interpretaciones de las señales MFL con referencia a la geometría de cada defecto. Una vez que se encuentran los componentes en un defecto y se explica cada uno de los componentes, es posible comprender el comportamiento de las señales MFL. Por ejemplo, para todos los defectos que se presentaran en este trabajo, en la Tabla 3 se muestran las dimensiones del primer defecto, así la Figura 3.1 nos muestra la señal radial de MFL calculada para el defecto tipo “V”.

Tabla 3.1 Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S1.

Defecto S1	Valor
Anchura del defecto	1000μm
Profundidad del defecto	500μm
Lift-off	2mm

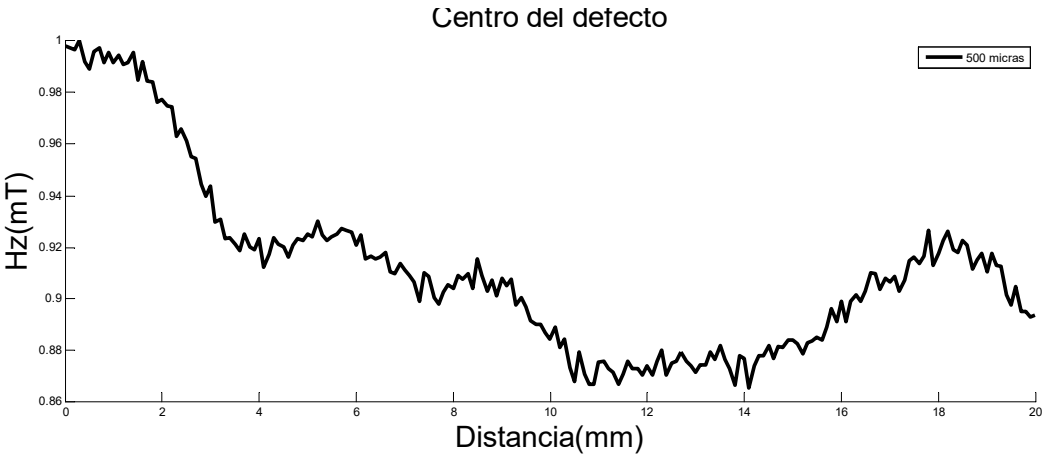


(b)

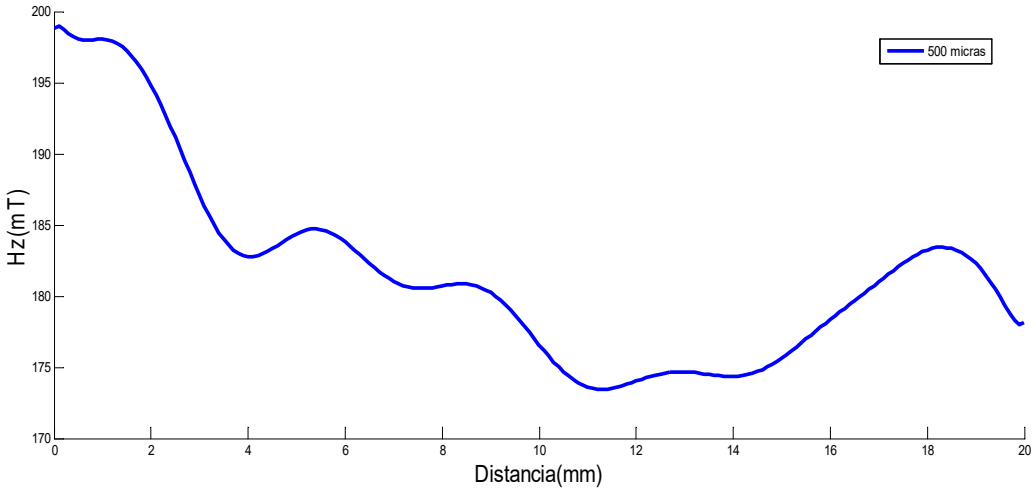


(a)

Figura 3.6. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo V normalizada.

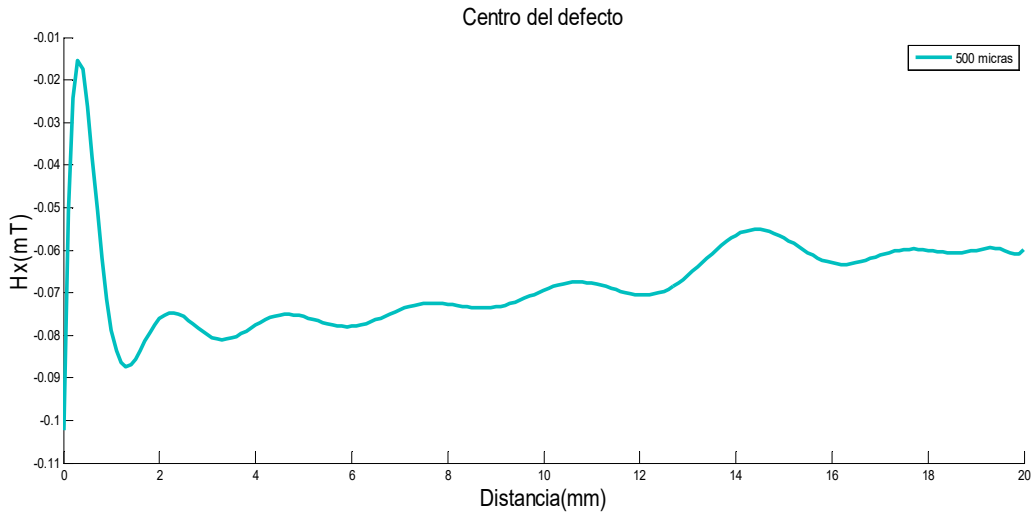


(b)

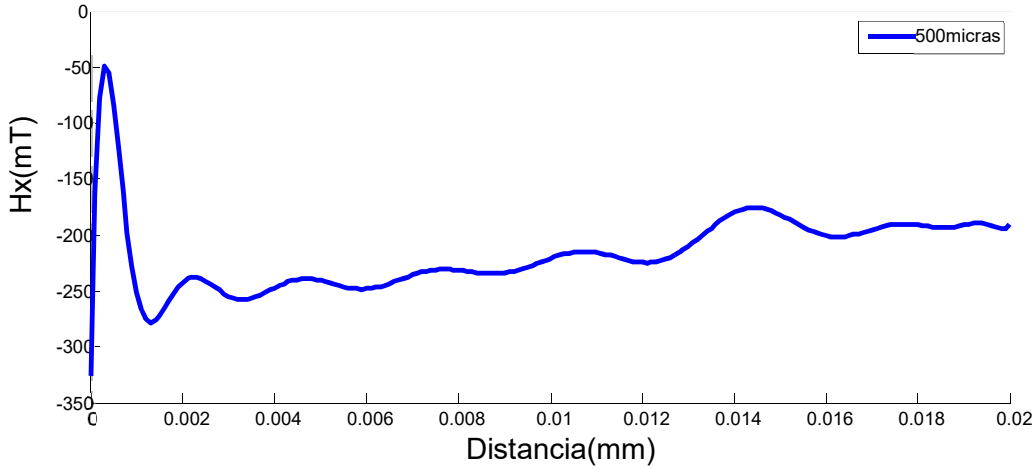


(a)

Figura 3.7. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.



(b)

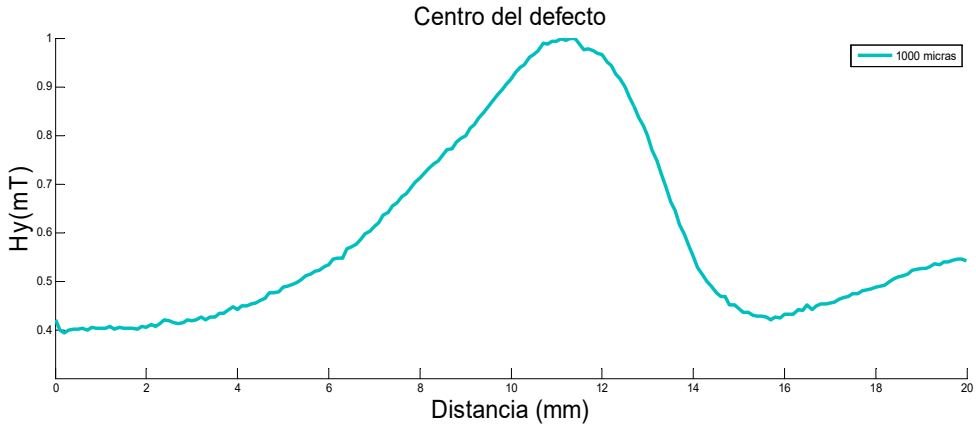


(a)

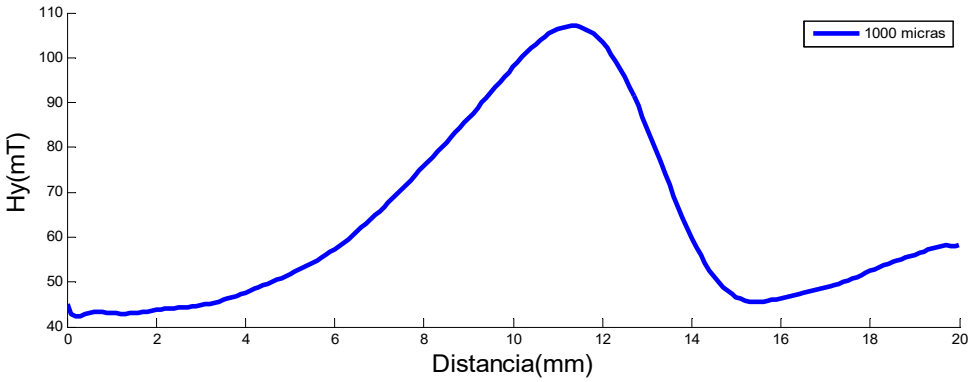
Figura 3.8. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Tabla 3.2. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S2.

Defecto S2	Valor
Anchura del defecto	1500µm
Profundidad del defecto	1000µm
Lift-off	2mm

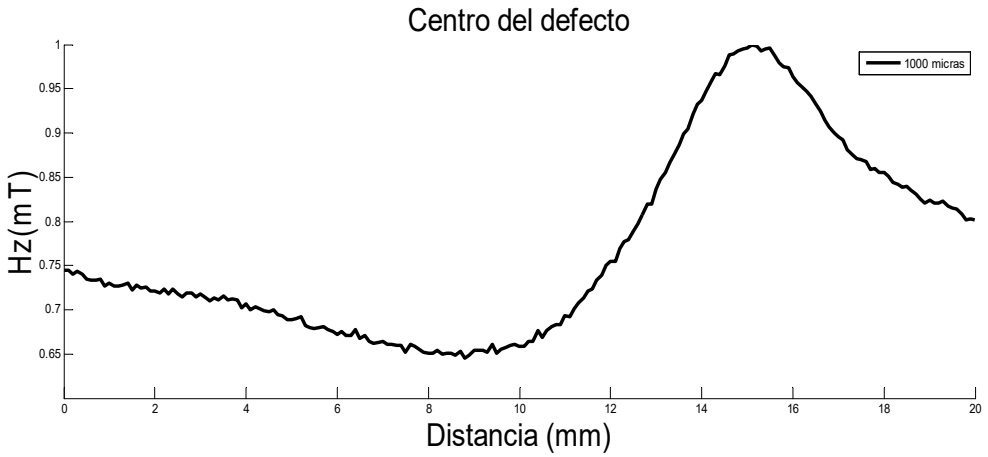


(b)

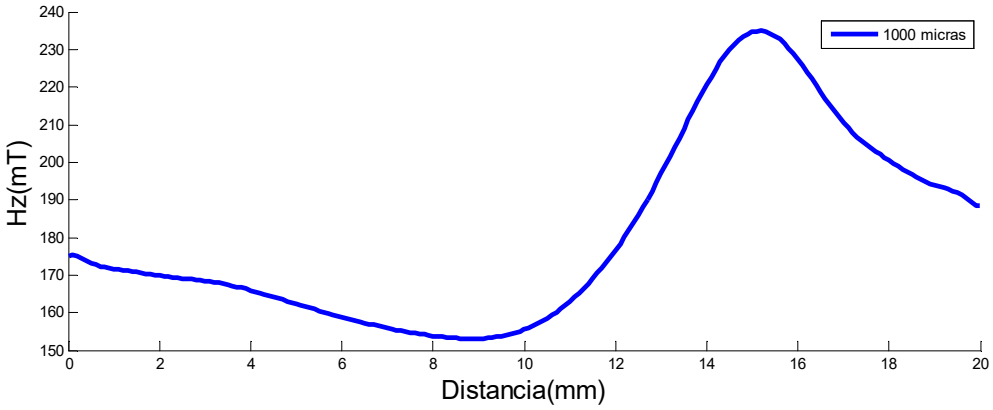


(a)

Figura 3.9. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

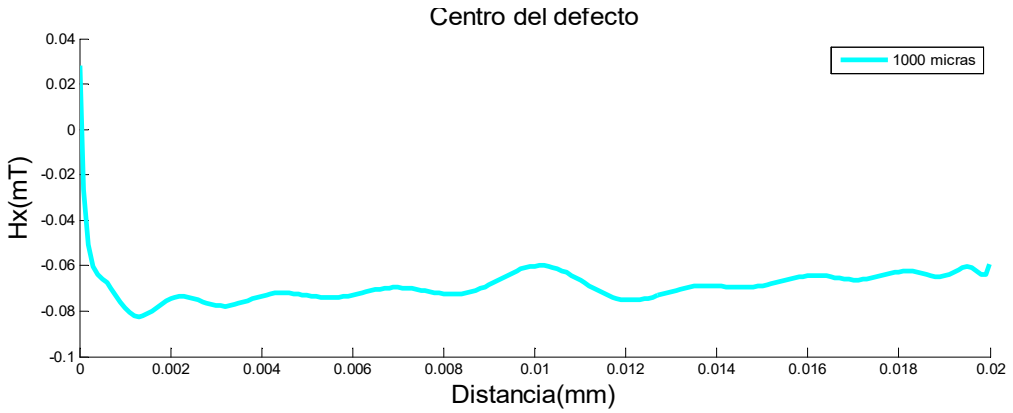


(b)

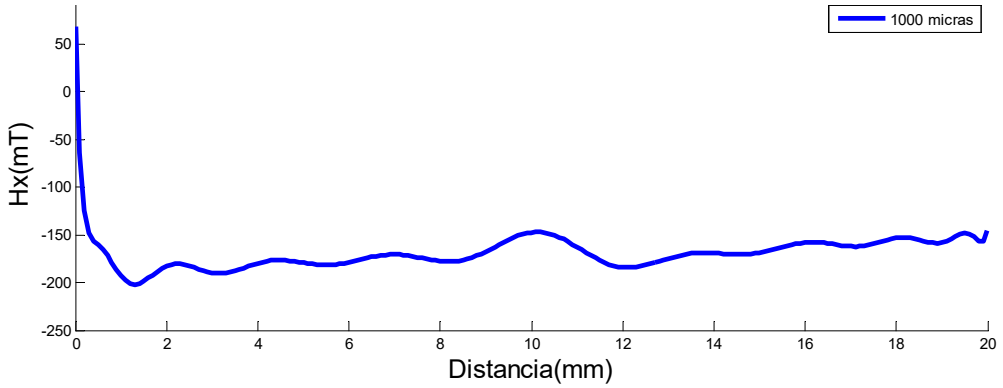


(a)

Figura 3.10. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V“ normalizada.



(b)

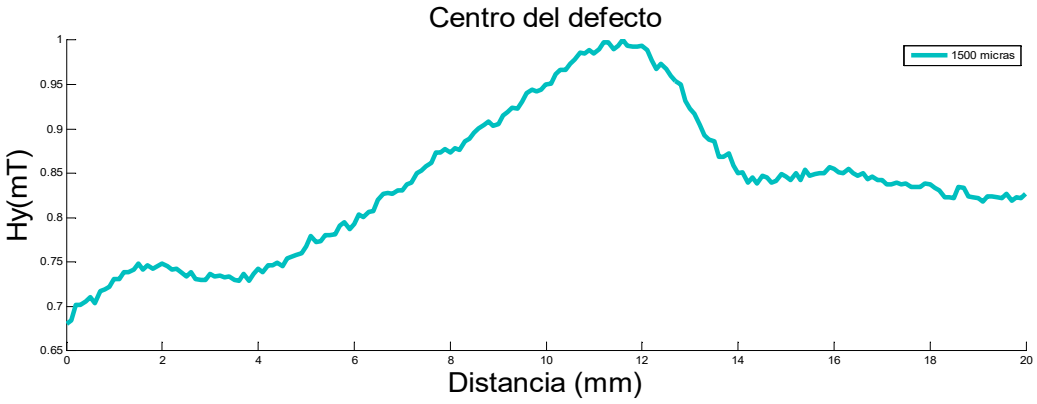


(a)

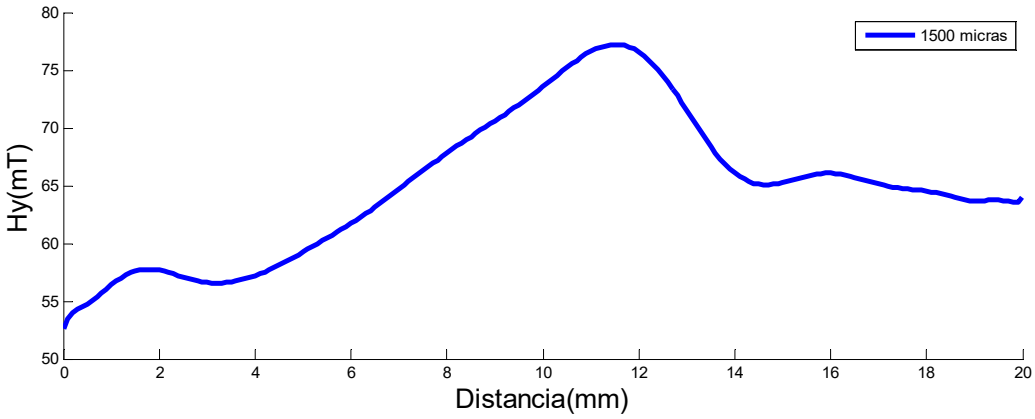
Figura 3.11. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Tabla 3.3. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S3.

Defecto S3	Valor
Anchura del defecto	2000µm
Profundidad del defecto	1500µm
Lift-off	2mm

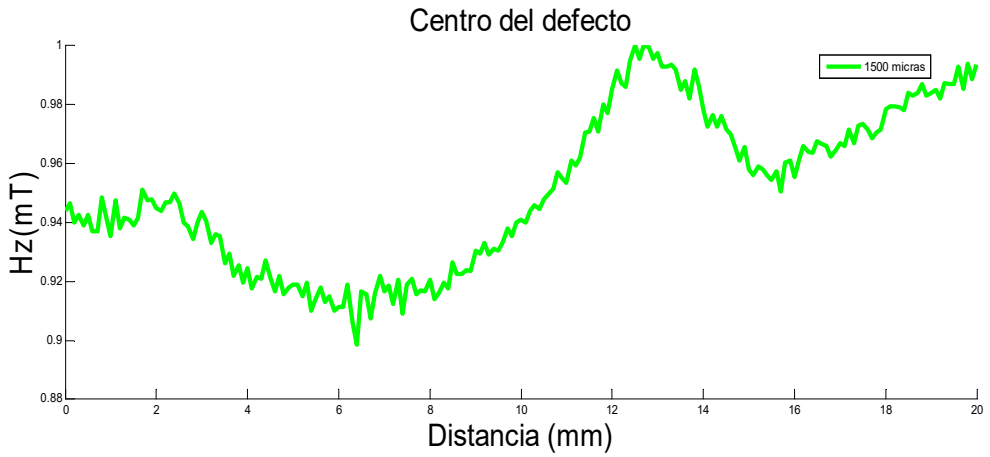


(b)

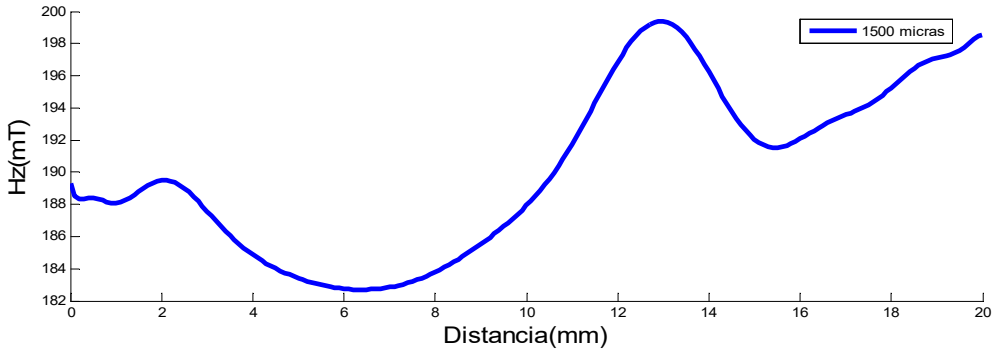


(a)

Figura 3.12. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

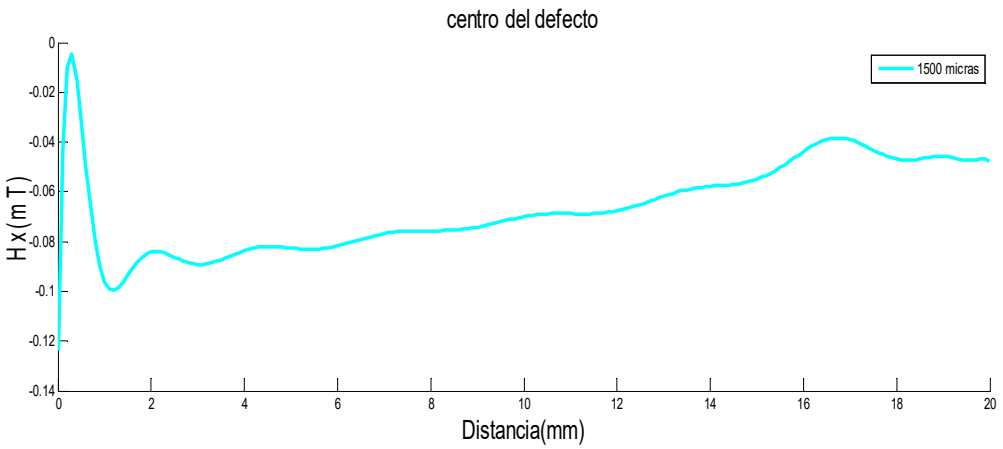


(b)

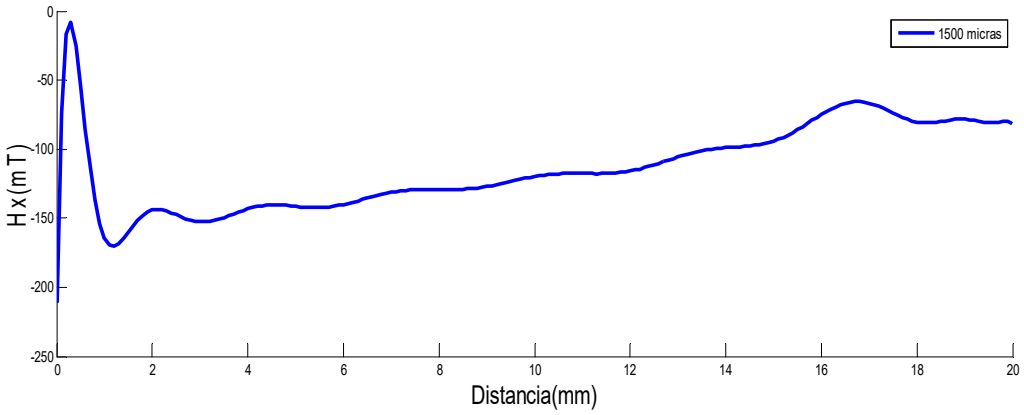


(a)

Figura 3.13. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.



(b)

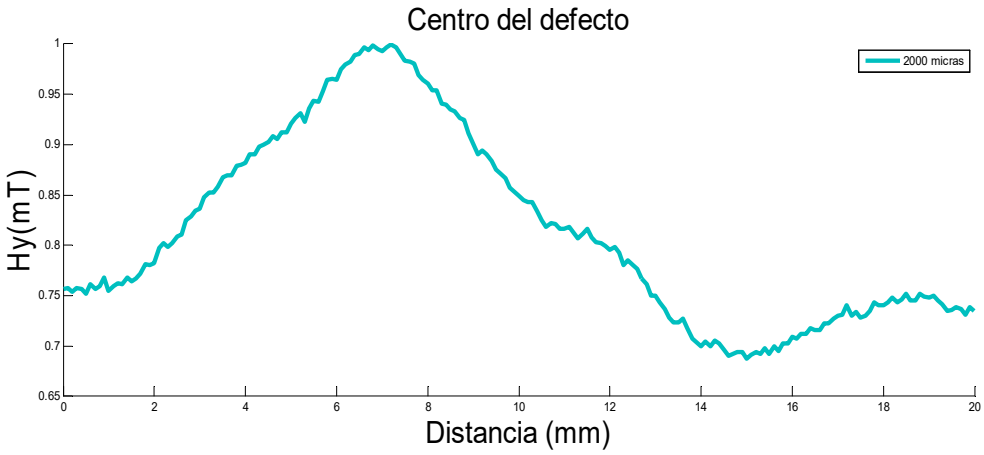


(a)

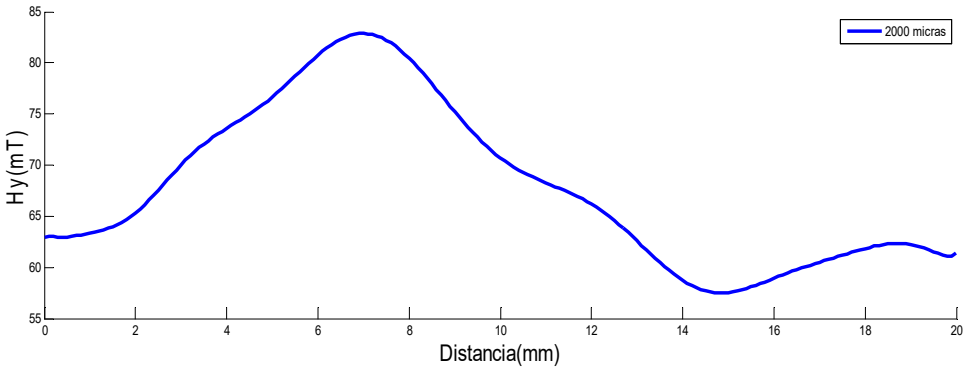
Figura 3.14. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Tabla 3.4 Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S4

Defecto S4	Valor
Anchura del defecto	3000µm
Profundidad del defecto	2000µm
Lift-off	2mm

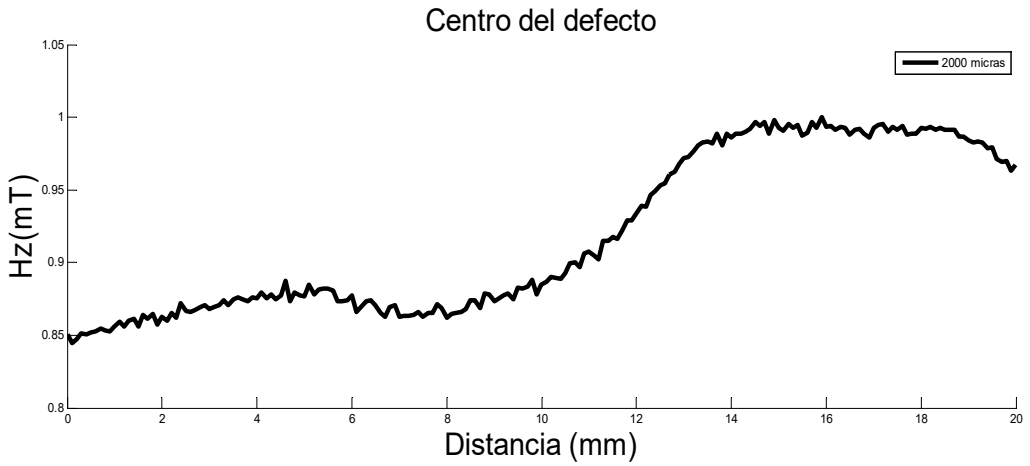


(b)

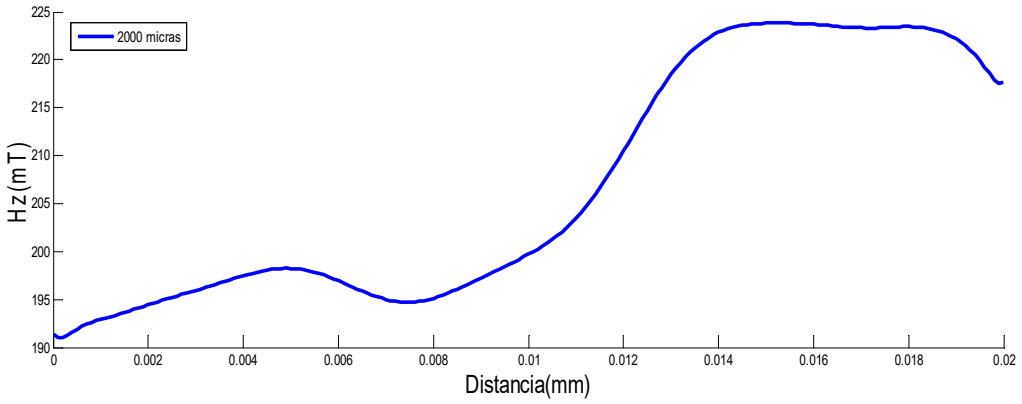


(a)

Figura 3.15. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente norma de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

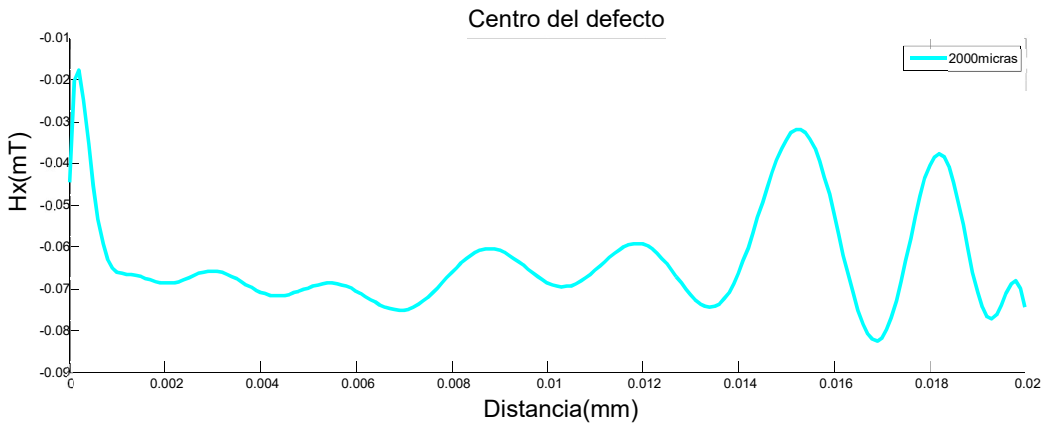


(b)

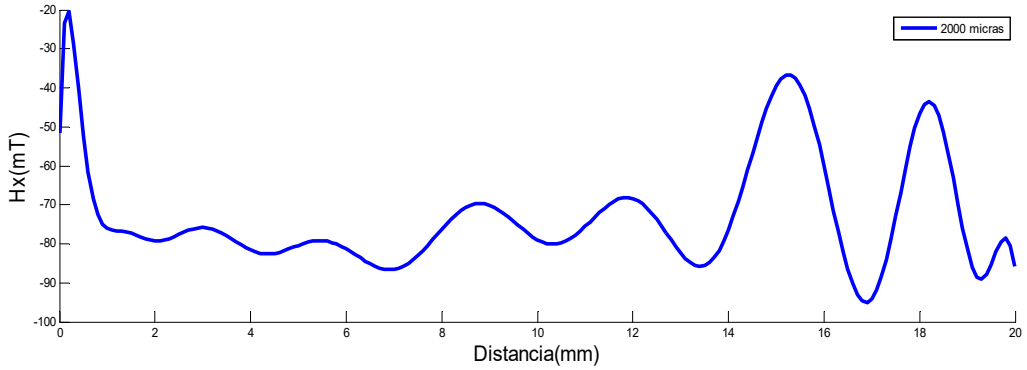


(a)

Figura 3.16. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.



(b)

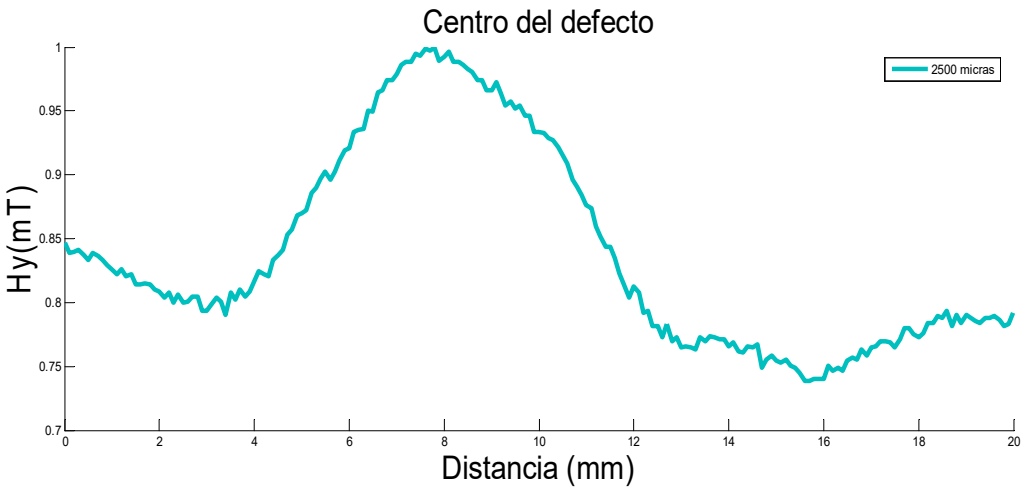


(a)

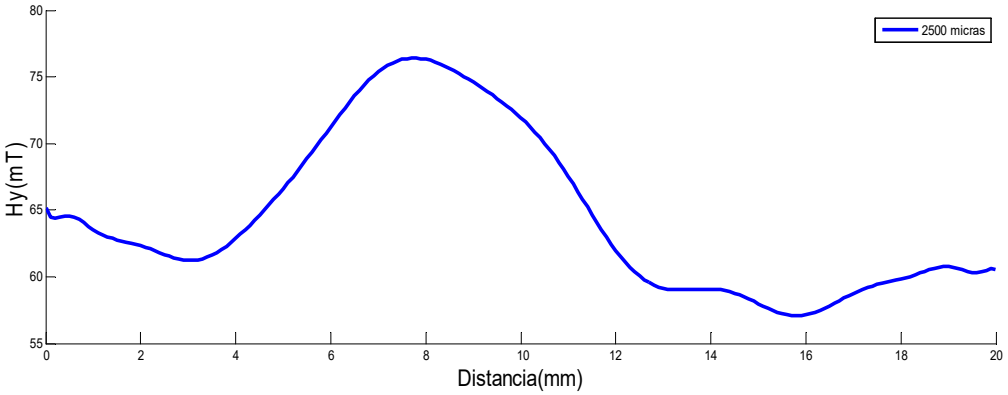
Figura 3.17. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

Tabla 3.5. Simulación de parámetros para análisis de SMFL en el defecto S5.

Defecto S5	Valor
Anchura del defecto	3500µm
Profundidad del defecto	2500µm
Lift-off	2mm

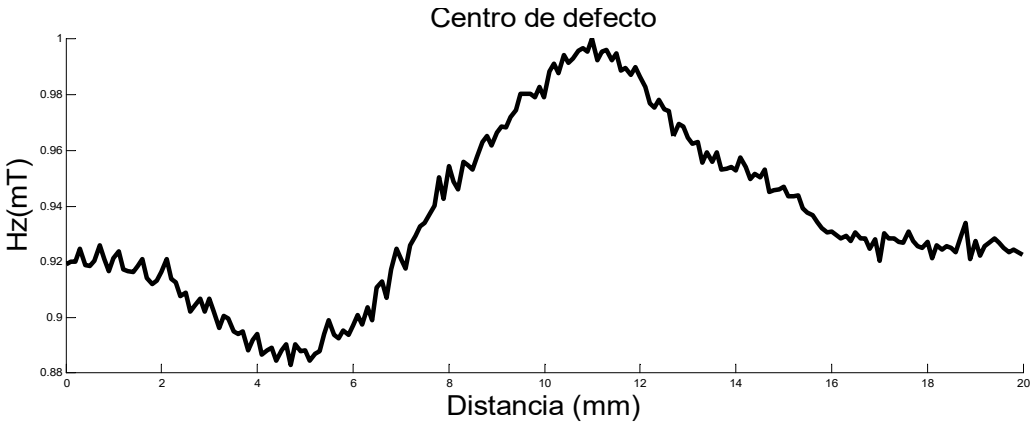


(b)

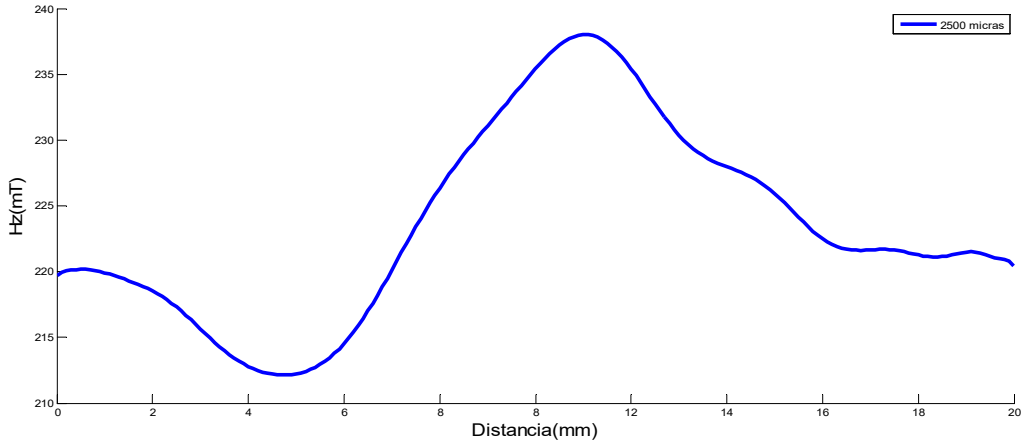


(a)

Figura 3.18. Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente normal de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

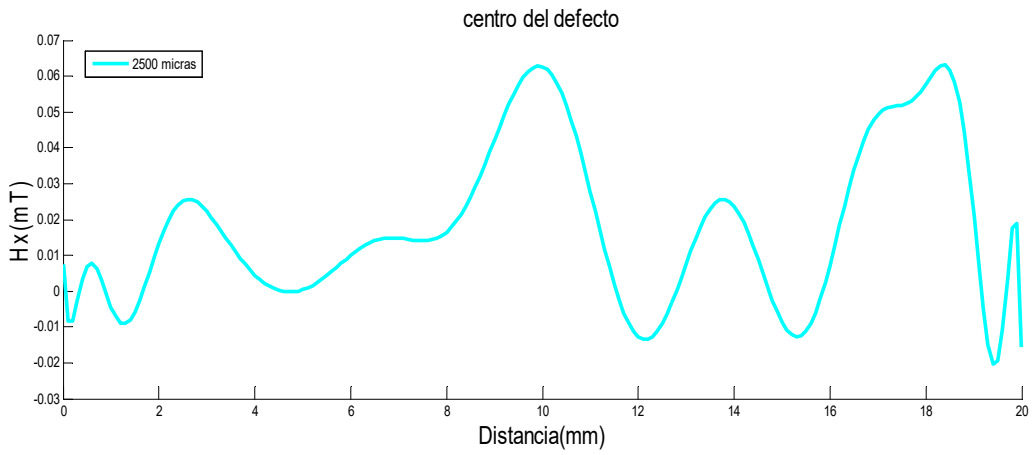


(b)

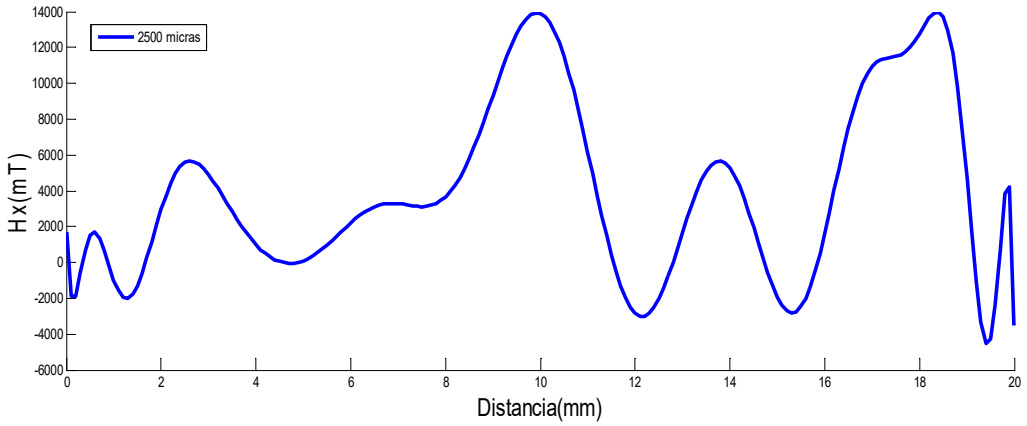


(a)

Figura 3.19. Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente tangencial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.



(b)



(a)

Figura 3.20. Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” (a) y (b) Componente axial de SMFL para un defecto tipo “V” normalizada.

3.4 Modelo Analítico: Defecto “V”.

- Las soluciones analíticas del defecto tipo “V” se pueden derivar.
- En el análisis de fuga de flujo magnético SMFL, las anomalías se caracterizan por su longitud, ancho y profundidad como un cono, incluso si la anomalía es más compleja.
- El material (A36 acero al carbón) alrededor del defecto es uniforme magnetizado cerca de la saturación. Por lo tanto, la distribución de dipolos puede considerarse en un enfoque de orden cero para ser homogénea distribuido sobre las superficies de la anomalía.
- Se asume que la permeabilidad relativa μ de la muestra es constante. Esta suposición asegura que solo la superficie las cargas contribuyen a la fuga de flujo magnético.
- El tamaño del defecto es pequeño en comparación con el diámetro de la tubería, es decir, la curvatura de la pared de la tubería puede ser descuidado.

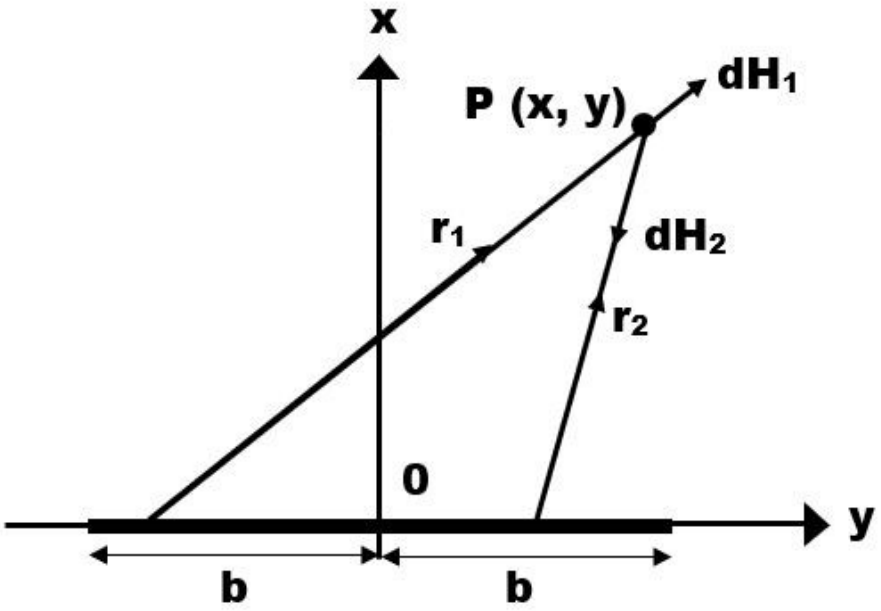


Figura 3.21. Modelo equivalente de dipolo magnético de zona de concentración de estrés.

Se supone que la SMLF en la zona de concentración de estrés se distribuye homogéneamente en la superficie de un elemento ferromagnético con ancho 2b en forma de cargas magnéticas de acuerdo con la teoría del campo electromagnético, por lo tanto, la intensidad del campo magnético en cualquier punto P (z, y) en la Figura 3.15 producida por el elemento diferencial dl se puede expresar como:

$$dH_1 = \frac{\rho dl}{2\pi\mu_0 r_1^2} r_1 \qquad \text{Ecuación(3.1)}$$

$$dH_2 = \frac{\rho dl}{2\pi\mu_0 r_2^2} r_2 \qquad \text{Ecuación(3.2)}$$

Donde $\boldsymbol{\rho}$ es una constante que denota densidad lineal.

Integrando las ecuaciones 3.1 y 3.2 el total de la fuerza de campo magnético en la dirección de *y x* al punto *P* se obtiene:

$$H_y = \frac{\rho}{2\pi\mu_0} \ln\left(\frac{\sqrt{(y+b)^2 + x^2} \cdot \sqrt{(y-b)^2 + x^2}}{x^2 + y^2} \right) \qquad \text{Ecuación(3.3)}$$

$$H_x = \frac{\rho}{2\pi\mu_0} \left(arc\tan\left(\frac{y+b}{x}\right) + arc\tan\left(\frac{y-b}{x}\right) - 2arc\tan\left(\frac{y}{x}\right) \right) \qquad \text{Ecuación(3.4)}$$

Es bien sabido que la tensión es producida cerca del defecto tipo “V” que se encuentra en la superficie del tubo ferromagnético y el estrés desde la punta del defecto alcanza su valor máximo. Se demostró desde experimentos anteriores que en la densidad en las grietas alcanza su valor máximo en la punta de la grieta y alcanza su valor mínimo alejándose de la punta de la grieta, la densidad de la dislocación se puede simplificar distribuyendo linealmente a lo largo de la superficie de la grieta tipo “V” (Roberto & Mitsudori, 1988).

De acuerdo con la teoría de cargas magnéticas se puede suponer que la densidad de carga magnética en la zona de concentración de la tensión se distribuye linealmente a lo largo de la grieta tipo “V”, como se muestra en la Figura 3.16.

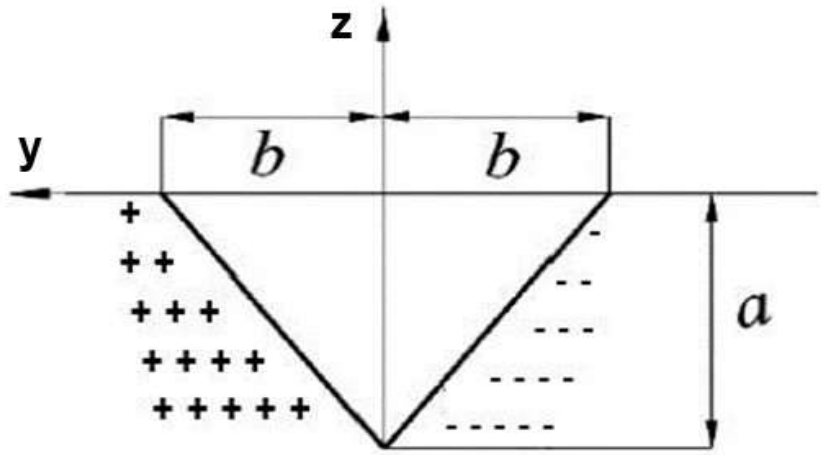


Figura 3.22. Densidad de dislocación y distribución de densidad de carga magnética.

Se asume que para el defecto tipo “V” el ancho es de *2b* y la profundidad es *a* y la densidad de carga magnética aumenta linealmente desde el eje hasta lo alto del defecto tipo “V”. La densidad de carga magnética puede ser obtenida de la siguiente forma.

$$p_1(y_1) = \frac{\sqrt{\left(b+y_1\right)^2+\left(\frac{a}{b}y_1+a\right)^2}}{\sqrt{b^2+a^2}}\rho_{max} \quad y_1 \in [-b,0], z_1 \in [0,a] \quad \text{Ecuación(3.5)}$$

$$p_2(y_2) = -\frac{\sqrt{\left(y_2-b\right)^2+\left(-\frac{a}{b}y_2+a\right)^2}}{\sqrt{b^2+a^2}}\rho_{max} \quad y_2 \in [0,b], z_2 \in [0,a] \quad \text{Ecuación(3.6)}$$

Donde ρ_{max} es la densidad de carga magnética en la zona de concentración de estrés.

Como consecuencia, los campos de fuga magnética dH_1 y dH_2 en cualquier punto espacial de P (x, y, z) son inducidos por los elementos de carga magnética dl_1 y dl_2, como se muestra en la Figura 3.17, las siguientes ecuaciones se dan en base a lo siguiente.

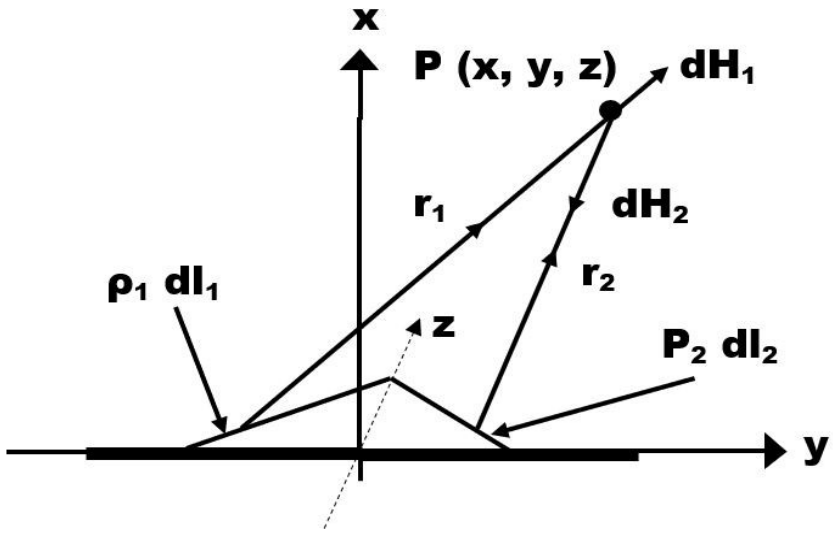


Figura 3.23. Modelo del campo magnético de auto-fuga magnética en zona de concentración de estrés.

$$dH_1(l_1) = \frac{\rho_1(y_1)\, dl_1}{2\pi\mu_0 r_1^2} r_1$$

Ecuación(3.5)

$$dH_2(l_2) = \frac{\rho_2(y_2)\, dl_2}{2\pi\mu_0 r_2^2} r_2$$

Ecuación(3.6)

donde:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ H/m$$

$$r_1 = \sqrt{(y-y_1)^2 + x^2 + (z-z_1)^2}\ \left(y_1 \in [-b, 0]\right)$$

$$r_2 = \sqrt{(y-y_2)^2 + x^2 + (z-z_2)^2}\ \left(y_2 \in [b, 0]\right)$$

$$dl_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\, dy_1 \left(y_1 \in [-b, 0]\right)$$

$$dl_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\, dy_2 \left(y_2 \in [b, 0]\right)$$

$$z_1 = \frac{a}{b} y_1 + a\left(y_1 \in [-b, 0] \right)$$

$$z_2 = \frac{a}{b} y_2 + a\left(y_2 \in [b, 0] \right)$$

Por lo tanto, se derivan las proyecciones de los vectores de campo magnético dH_1 y dH_2 en la dirección de *y, z,* respectivamente:

$$dH_{1y} = \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(b + y_1\right)^2 + \left(\frac{a}{b} y_1 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y - y_1\right)^2 + x^2 + \left(z - \frac{a}{b} y_1 - a\right)^2\right]}\left(y - y_1\right) dy_1, y_1 \in [-b, 0]$$

Ecuación(3.7)

$$dH_{1x} = \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(b + y_1\right)^2 + \left(\frac{a}{b} y_1 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y - y_1\right)^2 + x^2 + \left(z - \frac{a}{b} y_1 - a\right)^2\right]} x dy_1, y_1 \in [-b, 0]$$

Ecuación(3.8)

$$dH_{2y} = -\frac{\rho_{max}\sqrt{\left(y_2 - b\right)^2 + \left(-\frac{a}{b} y_2 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y - y_2\right)^2 + x^2 + \left(z + \frac{a}{b} y_2 - a\right)^2\right]}\left(y - y_2\right) dy_2, y_2 \in [0, b]$$

Ecuación(3.9)

$$dH_{2x} = -\frac{\rho_{max}\sqrt{\left(y_2 - b\right)^2 + \left(-\frac{a}{b} y_2 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y - y_2\right)^2 + x^2 + \left(z + \frac{a}{b} y_2 - a\right)^2\right]} x dy_2, y_2 \in [0, b]$$

Ecuación(3.10)

Integrando las ecuaciones 3.1 a 3.4 tenemos:

$$H_y = \int_{-b}^{0} dH_{1y} + \int_{0}^{b} dH_{2y}$$

$$\int_{-b}^{0} \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(b+y_1\right)^2+\left(\frac{a}{b}y_1+a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y-y_1\right)^2+x^2+\left(z-\frac{a}{b}x_1-a\right)^2\right]}\left(y-y_1\right)dy_1 \quad -$$

Ecuación(3.11)

$$\int_{0}^{b} \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(y_2-b\right)^2+\left(-\frac{a}{b}y_2+a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y-y_2\right)^2+y^2+\left(z+\frac{a}{b}-a\right)^2\right]}\left(y-y_2\right)dy_2$$

$$H_x=\int_{-b}^{0} dH_{1x}+\int_{0}^{b} dH_{2x}$$

$$\int_{-b}^{0} \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(b+y_1\right)^2+\left(\frac{a}{b}y_1+a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y-y_1\right)^2+x^2+\left(z-\frac{a}{b}y_1-a\right)^2\right]}xdy_1 \quad -$$

Ecuación(3.12)

$$\int_{0}^{b} \frac{\rho_{max}\sqrt{\left(y_2-b\right)^2+\left(-\frac{a}{b}y_2+a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b\left[\left(y-y_2\right)^2+x^2+\left(z+\frac{a}{b}y_2-a\right)^2\right]}xdy_2$$

Para las investigaciones los efectos de los diferentes anchos de zonas plásticas de auto-fuga de campo magnético se muestran las siguientes graficas en donde el campo magnético está normalizado. Las señales de memoria magnética normalizada son a=500μm, a=1000μm, a=1500μm, a=2000μm, a=2500μm de profundidad que se muestra en la Figura 3.24 y en la Figura 3.25, respectivamente, donde la distancia de sensor a el defecto tiene un valor de x = 2 mm.

Se ve claramente en la Figura 3.24 como las componentes tangenciales aumentan notablemente con los aumentos de las profundidades de cada grieta, esto es, entre menor sea la profundidad de la grieta mayor es el pico en la posición máxima de concentración de estrés Hyp. Los valores están relacionados con los estados reales de tensión-deformación, que reflejan los grados de severidad del daño en los componentes. De igual forma, en la gráfica Hzp-p los valores tangenciales incrementan en la zona correspondiente a medida que va disminuyendo la profundidad de la grieta.

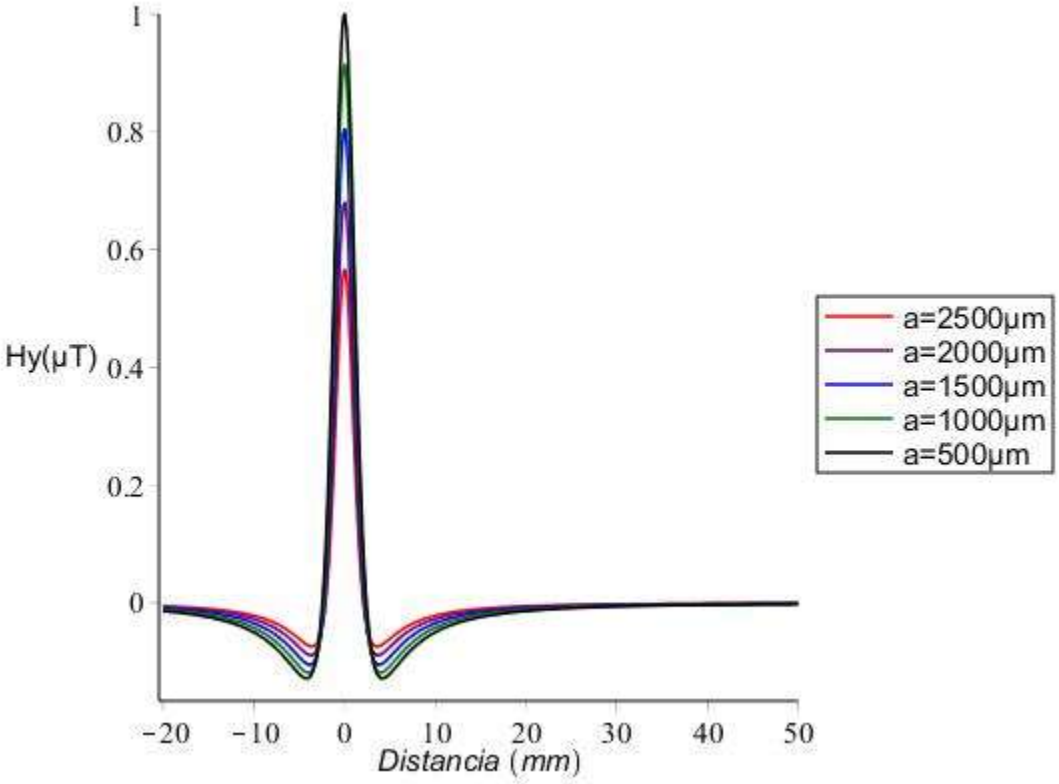


Figura 3.24. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de la fuga de campo magnético, componente tangencial.

Los resultados analíticos son mostrados en las gráficas de la Figura 3.24 y la Figura 3.25 en donde se representa una variación de profundidad del defecto tipo V.

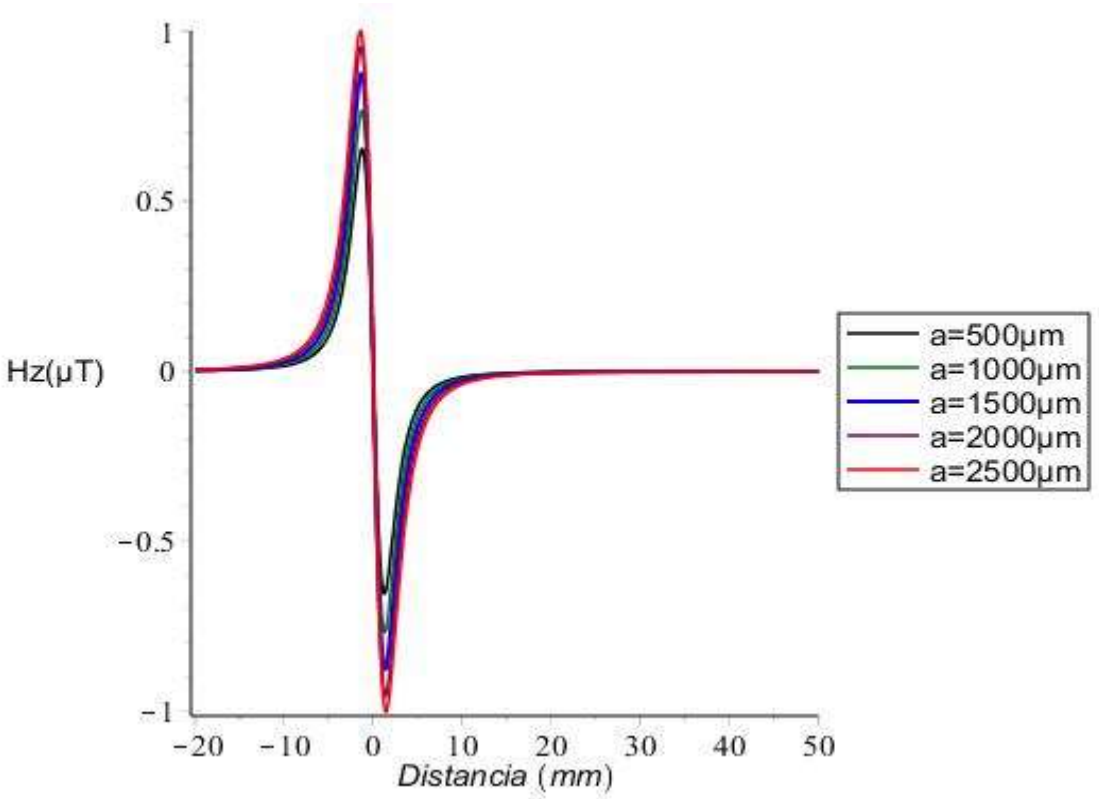


Figura 3.25. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de la fuga de campo magnético, componente normal.

Se observa en las Figura 3.26 y Figura 3.27 que de acuerdo a el tamaño de la profundidad de la grieta entre más pequeña sea esta, mucho mayor será el campo magnético captado por el sensor, mientras que entre mayor la profundidad de la grieta habrá campos magnéticos menores para este caso. Para la programación de los modelos matemáticos graficados con los parámetros correspondientes se encuentran en el ANEXO III .

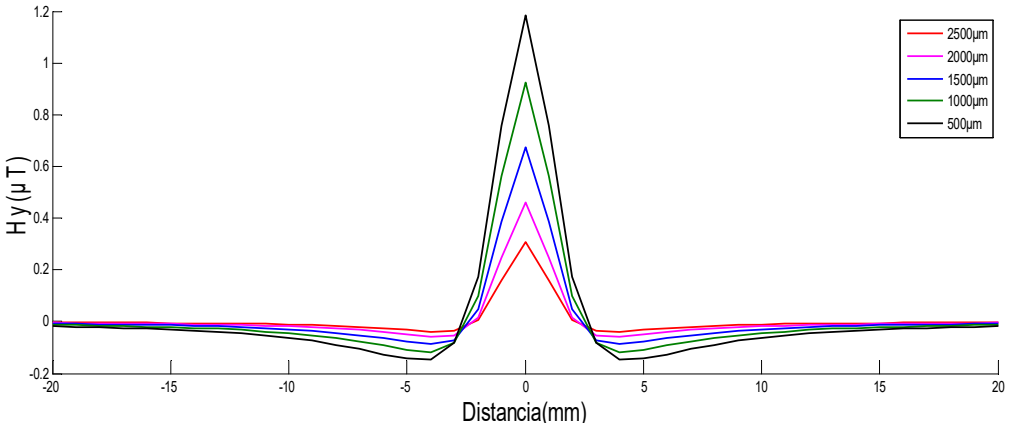


Figura 3.26. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de fuga de campo magnético que se obtiene por Matlab, componente tangencial .

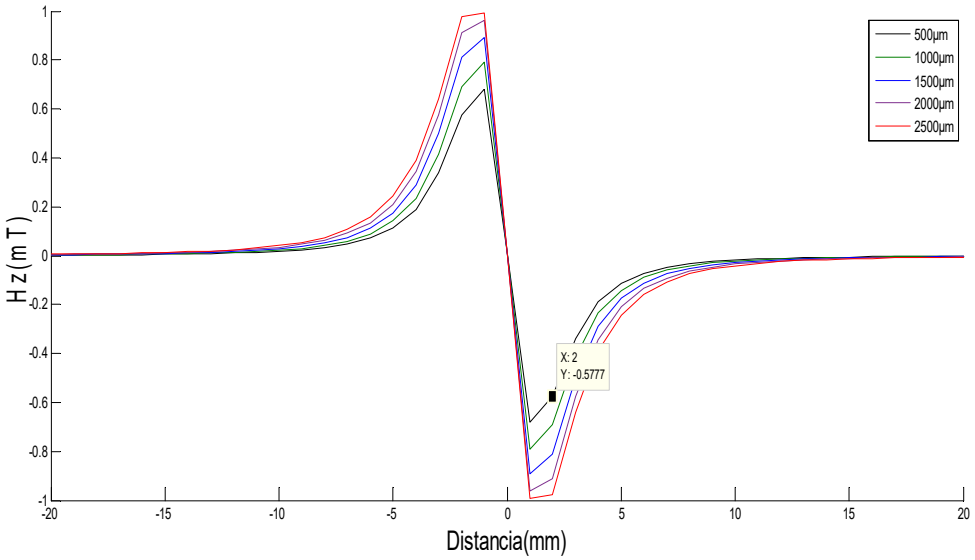


Figura 3.27. Efecto de estrés en la zona de concentración sobre el rango de la fuga de campo magnético que se obtiene por Matlab, componente normal.

Se puede tener en cuenta que el método de memoria magnética no puede ser utilizado para realizar mediciones directas de daño absoluto ya que la señal de memoria magnética está influenciada por campos magnéticos externos, incluido el campo geomagnético. Sin embargo, solo refleja indirectamente el grado de concentración de severidad en los componentes.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Para realizar la experimentación y la obtención de los resultados de las mediciones de SMFL en las grietas sobre el tubo ferromagnético por medio del método de memoria magnética (MMM), se construyó un sistema que permitiera la obtención de las señales de manera sencilla, fácil manejo y de bajo costo.

4.1 Sistemas expertos.

Una primera concreción de sistema experto se debe a Edward Feigenbaum, de la Universidad de Stanford, quien en 1977 lo definió como “un programa inteligente para ordenador y que usa conocimiento y procedimientos de inferencia para resolver problemas, que son lo suficientemente difíciles como para requerir la intervención de un experto humano para su resolución” (Feigenbaum, 1977) (Barr, Cohen, & Feigenbaum, 1989). Giarratano, J. y Riley, G. definen un Sistemas Experto como “Un sistema computacional que emula la capacidad de toma de decisiones de un experto humano en un dominio restringido (Giarratano & Riley, 2001).

Para definir el sistema que se utilizó para obtener los resultados de las mediciones de los defectos sobre el tubo ferromagnético ASTM-A-36 de profundad (500μm, 1000μm, 1500μm, 2000$\mu m, 2500\mu m$) y de anchura de (1000$\mu m, 1500\mu m$, 2000μm, 3000$\mu m, 3500\mu m$) se muestra el siguiente sistema de detección de fuga en la Figura 4.1.

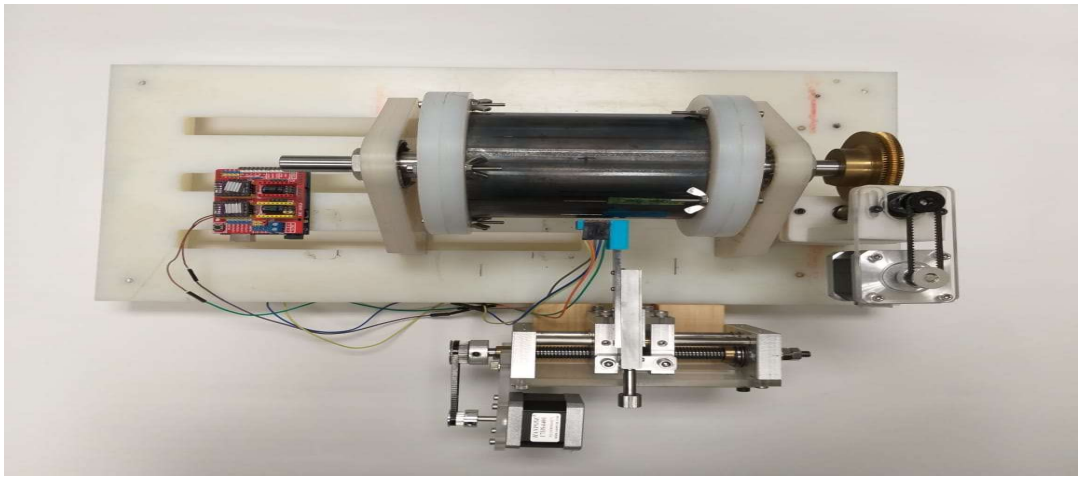


Figura 4.1. Sistema de detección de fuga de campo magnético.

Para los diferentes tipos de defectos se utilizó un tubo ferromagnético ASTM-A-36 con dimensiones de longitud de 150 mm, diámetro exterior de 90 mm, espesor de 36.5 mm, anchura de tubo de 120 mm.

Figura 4.2. Tubo ferromagnético ASTM-A-36.

Tabla 4.1. Parámetros de los defectos tipo “V” en el tubo ferromagnético ASTM-A-36.

Defecto	Anchura (μm)	Profundidad (μm)
S1	1000	500
S2	1500	1000
S3	2000	1500
S4	3000	2000
S5	3500	2500

Dado que, los datos que se obtienen serán por cada defecto con respecto a su anchura y profundidad. La distancia axial (horizontal) de cada defecto es de aproximadamente 20 mm, cada defecto hecho de manera radial tiene como se muestra en la tabla, una distancia que separa a cada defecto uno de otro, esto para facilitar la medición de cada defecto.

4.2 Maquinado de defectos tipo “V” en tubo ferromagnético ASTM-A-36.

Primeramente, para maquinar cada defecto se toma en cuenta el diámetro del tubo ferromagnético ASTM-A-36 y la distancia a la que van separados cada defecto. Se considera una distancia de 20mm radiales de separación entre cada defecto.

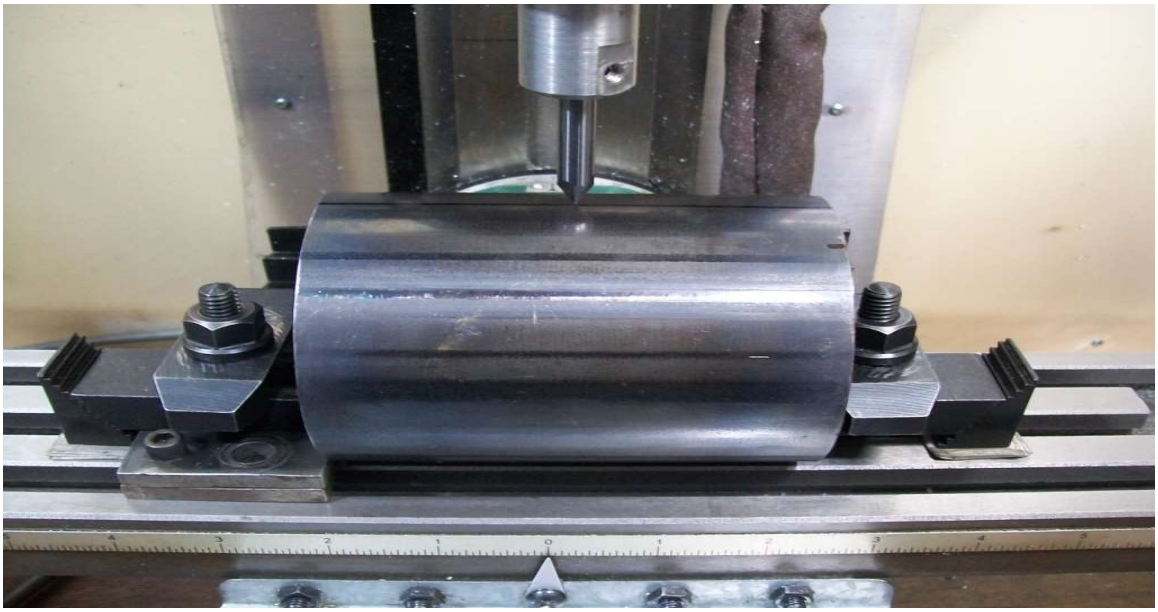


Figura 4.3. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 colocado en la CNC para maquinado de defectos tipo “V”.

Una vez marcados las distancias de los defectos en el tubo ferromagnético comienza su maquinado, para el maquinado de los defectos de este tubo ferromagnético se empezó por el defecto de menor profundidad hasta el de mayor profundidad de acuerdo con los datos dados en la Tabla 4.1, las mediciones es necesario hacer un barrido de todas las grietas Figura 4.2, por tanto, en las gráficas obtenidas se señala defecto por defecto su ubicación.

Figura 4.4. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V”.

De acuerdo con la Figura 4.4 se observa el tubo con los defectos maquinados.

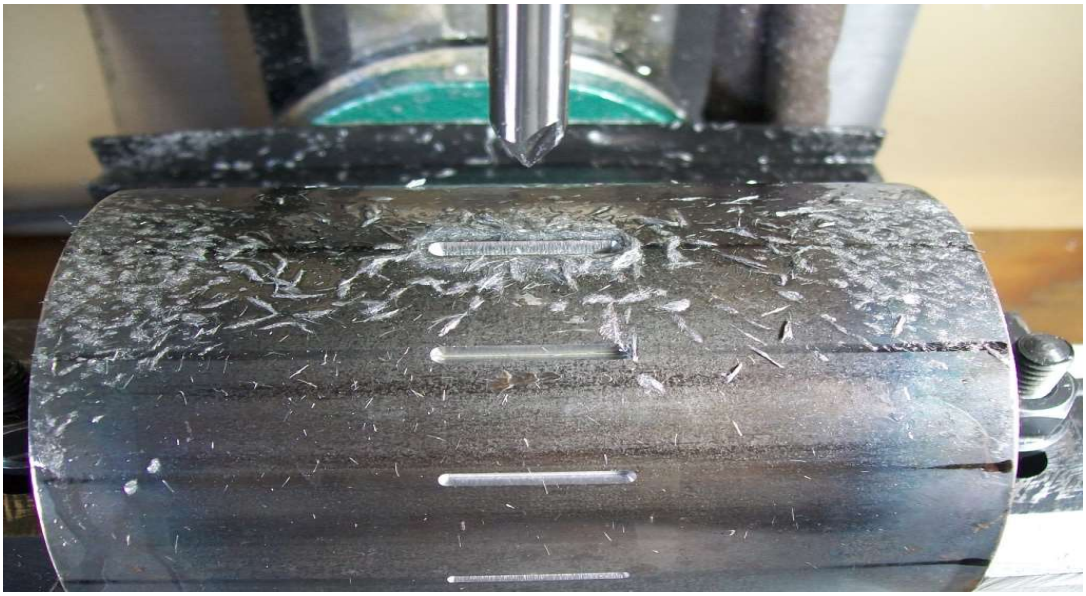


Figura 4.5. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo “V” terminados.

En la Figura 4.5 se muestra el maquinado del tubo ferromagnético para los defectos semielipticos.

Figura 4.6. Tubo ferromagnético ASTM-A-36 con defectos tipo semi elíptica.

4.3 Disco Reductor de velocidad.

Para la rotación del tubo se maquino un disco reductor de velocidad con un diámetro interno de 78.5 mm y diámetro 89 mm, 5.5mm de espesor de tubo. Su funcionamiento está en base a la velocidad del motor NEMA 17 que controla la velocidad del tubo ferromagnético para escaneo de los defectos, así pues, para la adquisición de datos es necesario una velocidad mínima, pues la distancia radial de separación entre cada defecto que el sensor recorre para escanear cada defecto es de 20 mm. El disco reductor de velocidad se muestra en la figura.

Figura 4.7. Disco reductor de velocidad sin muescas.

La Figura 4.7 muestra el maquinado final del disco reductor de velocidad, este consta de 102 muescas de forma radial que se acopla al soporte en donde se colocará el tubo ferromagnético en conjunto con el motor a pasos NEMA 17.

$r = 1.8/(8 \times 102)$= 0.0022 paso

Am= $(\pi \times D \times r)/(360 \times 1000)$= 1.72 grados

donde *r* equivale a los pasos de motor, *D* es el diámetro del tubo que es de 90 mm, 1.8 son los grados a los que equivale un paso del motor a pasos, 102 son el número de muescas con las que consta el disco reductor. Los pasos y los

grados que nos proporciona el disco reductor junto con el motor a pasos NEMA-17 nos ayudarán a el recorrido que el tubo ferromagnético realiza en una distancia radial (horizontal) para el escaneo de cada defecto.

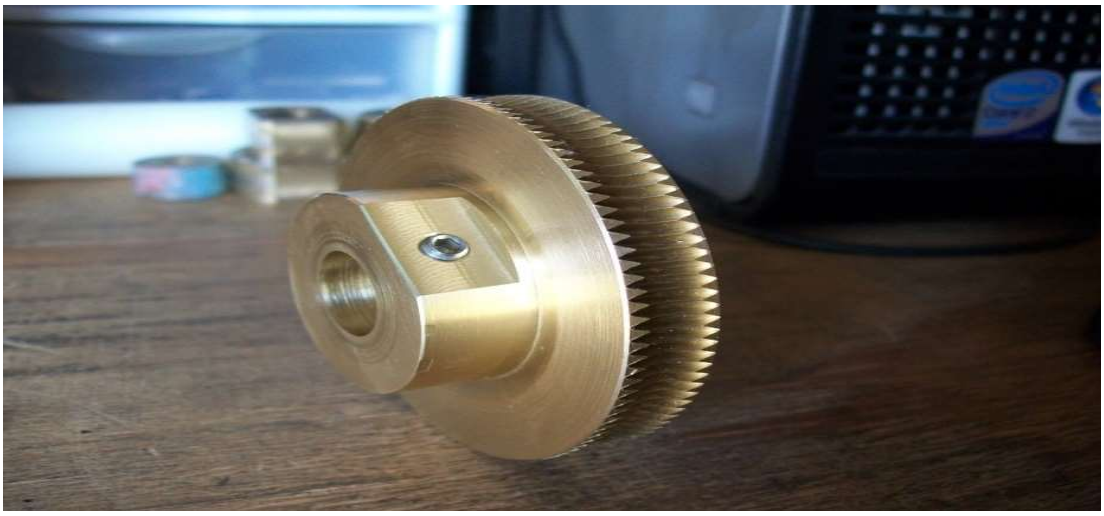


Figura 4.8. Disco reductor de velocidad maquinado con muescas.

4.4 Base de soporte para tubo ferromagnético.

Se construyó una base de material polímero para soportar el tubo ferromagnético, el disco reductor y el motor NEMA-17, el cual nos permitirá realizar las medicines de los defectos tipo “V” en el tubo ferromagnético. La base del soporte del tubo se muestra en la Figura 4.9.

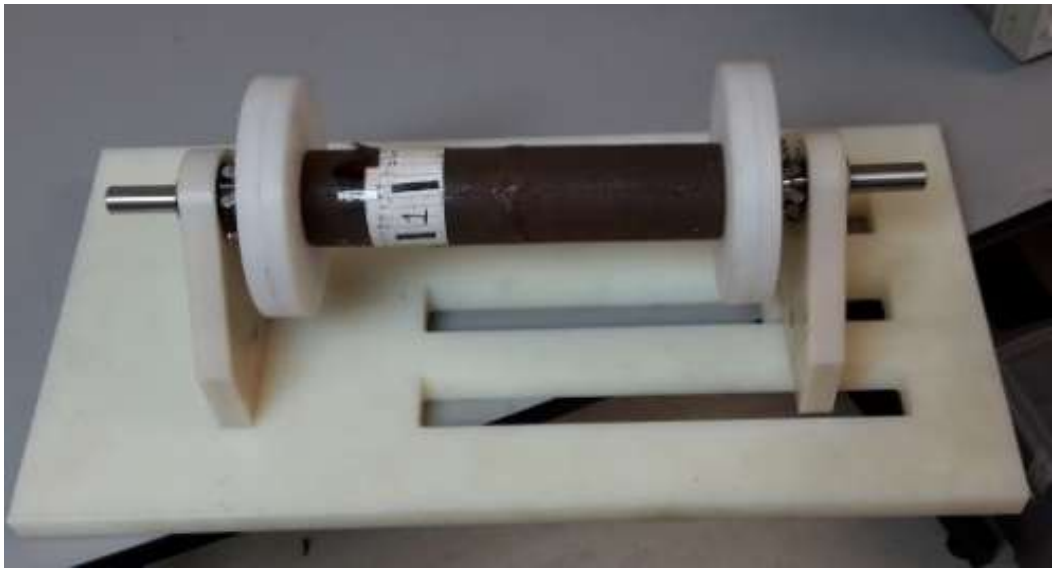


Figura 4.9. Sistema mecánico rotativo.

4.5 Motor a pasos NEMA-17.

El sistema está programado para que el tubo ferromagnético tenga un movimiento rotatorio de forma axial, ya sea de arriba hacia abajo o viceversa. Esto es posible por el movimiento de Motor 1 que permite tener un control de la posición cuando se rota el tubo ferromagnético sobre el eje del sistema. El Motor 2 nos permite tener el control del sensor tipo Hall modelo MAG3110 sobre el eje axial, esto nos ayuda a tener una mayor exactitud de medición y a tener el control de la distancia también llamada (Lift-off) que es la distancia que hay entre el sensor y el tubo ferromagnético. Esta distancia se puede variar y la literatura nos muestra los cambios que ocurren cuando se realizan las diferentes mediciones, adquiriendo los datos y graficándolos se muestran mínimas variaciones en las pendientes de las gráficas.

Figura 4.10. Motor paso a paso NEMA 17.

Este motor paso a paso NEMA 17 es bipolar, tiene un ángulo de paso de 1.8º (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.7A a 12V, capaz de cargar con 4Kg/cm, con un torque: 4000g/cm, modelo: 17HS4401, 17HS series size 42mm, resistencia de la fase: 1.5 ohms, inductancia de la bobina: 2.8mH, el largo del cableado para conexión de los motores a pasos con el DRV8825 es de 25 cm, el eje del motor es de 5mm diámetro / 20 mm de largo con el cual se acopla una polea de 5mm de diámetro.

4.6 Sensor magnético efecto Hall MAG3110.

El sensor de efecto Hall para su funcionamiento utiliza el efecto Hall para la medición de campos magnéticos y eléctricos. Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Los sensores Hall se utilizan en señales salientes análogas para campos magnéticos muy débiles un ejemplo de ello son el (campo magnético terrestre). Este sensor nos es muy útil para el método de memoria magnética pues los campos generados por los defectos son muy pequeños en el orden de mT. En la figura se muestra el sensor MAG3110 el cual nos proporciona

una medición de campo magnético de los defectos que están en el orden de las μm de profundidad y anchura.

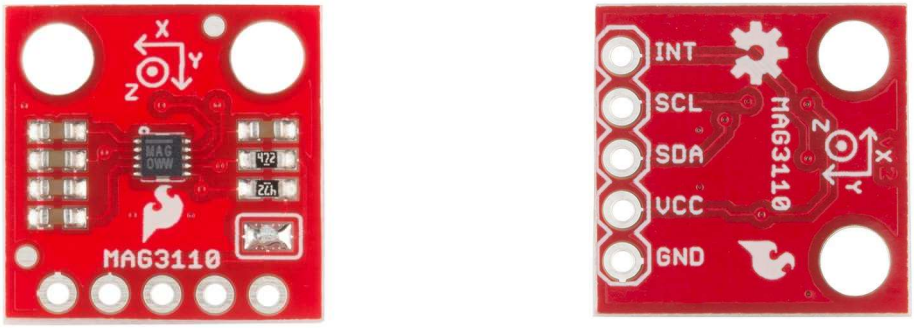


Figura 4.11. Magnetómetro MAG3110.

El sensor detecta las componentes en los tres ejes axiales del campo magnético de fuga, su sensibilidad es la más adecuada de los 5 sensores y su precio es el más accesible de todos.

El sensor de efecto Hall se conecta mediante cuatro cables eléctricos. Uno de los pines GND corresponde con la conexión a la tierra (-), VCC corresponde con la alimentación que suele ser de 5 ó de 12 voltios. El tercer cable corresponde con la señal de salida del sensor. La posición del sensor es colocada en el eje X de acuerdo a las coordenadas que trae por default para su funcionamiento. Se coloca a una distancia de Lift-off de x=2 mm, sostenido por una placa de plástico como se muestra en la Figura 4.11.

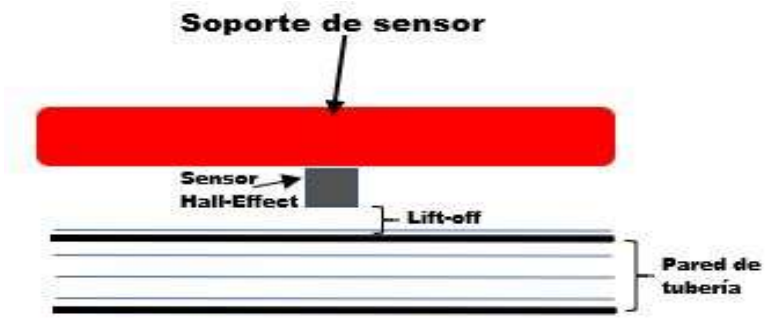


Figura 4.12. Soporte de sensor MAG3110 y distancia (lift-off) a la que se coloca el sensor.

La distancia del sensor hacia la grieta que se censa tiene influencia en los resultados de la señal SMFL. Por lo tanto, la distancia (lift-off) se considera constante para esta investigación.

4.6 Etapa de potencia.

La etapa de potencia controla el giro de los motores a paso a paso NEMA-17 bipolares y cada motor cuenta con un dos bobinas. El cambio de polaridad de las bobinas de cada motor nos da el movimiento de giro.

4.6.1Tarjeta Arduino Uno.

La programación del Motor 1 y Motor 2 es realizada por medio de la tarjeta Arduino Uno, donde se da dirección de giro de los dos motores ya sea de forma axial o radial. La tarjeta Arduino Uno junto con Matlab también nos ayuda a la adquisición de los datos obtenidos de las medicines en conjunto con la tarjeta CNC Shield.

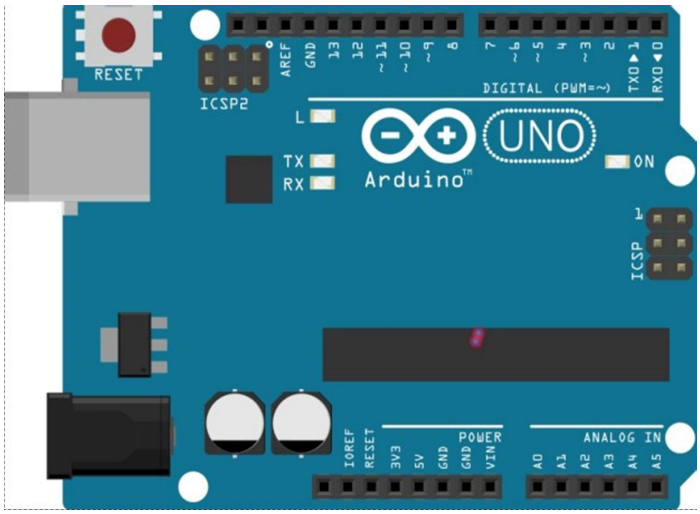


Figura 4.13. Tarjeta Arduino Uno para la adquisición de datos.

Las conexiones que van directamente a Arduino son las que van al sensor MAG3110 en los pines SCL, SDA los cuales corresponden a los pines marcados en la tarjeta de Arduino Uno como se muestran en la Figura 4.14. Estos pines son los que se utilizan para la comunicación entre ambos. El pin SDA manda los datos y SCL manda los pulsos de reloj.

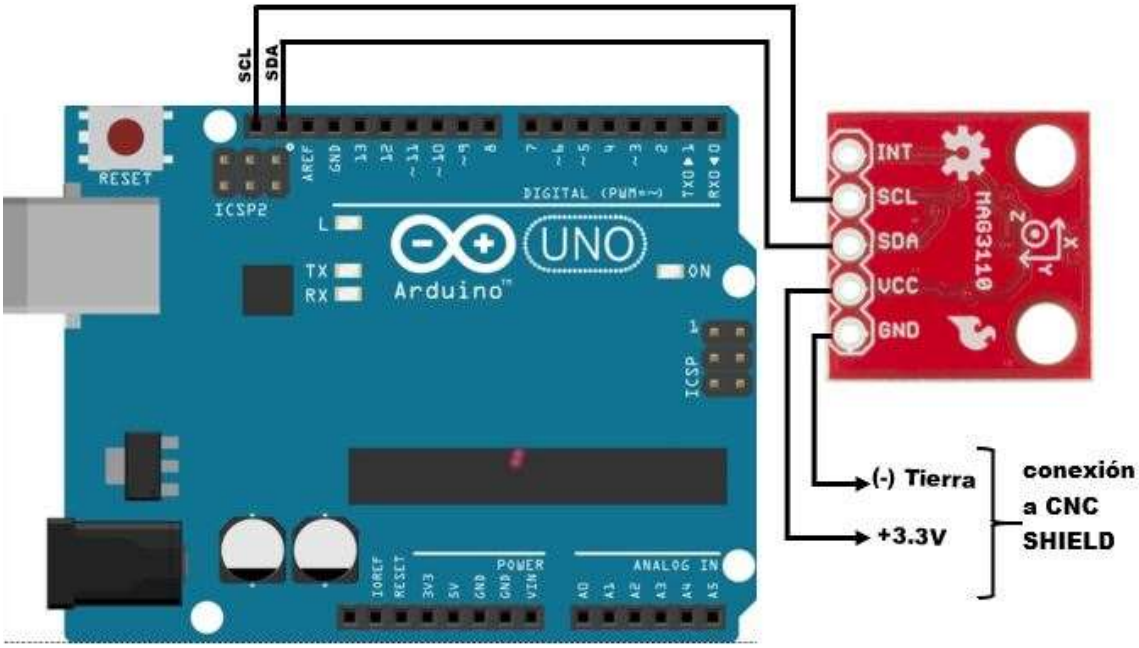


Figura 4.14. Conexión de sensor MAG3110 a tarjeta Arduino uno.

4.6.2 Controladores DRV8825.

El DVR8825 es un controlador (drive) que simplifica los pasos para manejar los motores paso a paso desde un procesador como Arduino, para este sistema de detección de grietas es necesario el manejo de dos DVR8825 y de dos motores paso a paso NEMA-17. Estos controladores son los encargados de coordinar los dos motores a pasos para el sistema. En la Figura 4.15 se muestra físicamente la conexión.

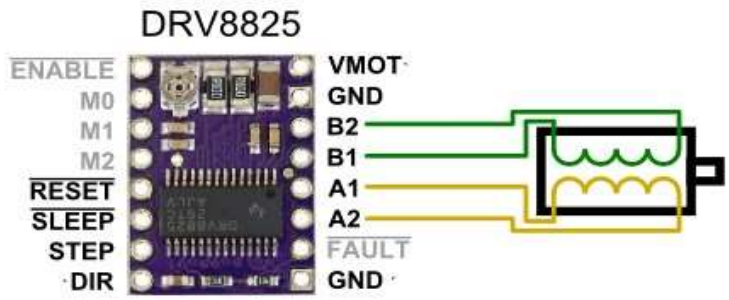


Figura 4.15. Diagrama de alambrado de conexión del microcontrolador DVR8825 a motor paso a paso NEMA-17.

Estos controladores nos permiten manejar los altos voltajes e intensidades que requieren estos motores, limitar la corriente que circula por el motor, y proporcionan las protecciones para evitar que la electrónica pueda resultar dañada. Para su control únicamente requieren dos salidas digitales, una para indicar el sentido de giro y otra para comunicar que queremos que el motor avance un paso. Además, permiten realizar microstepping, una técnica para conseguir precisiones superiores al paso nominal del motor.

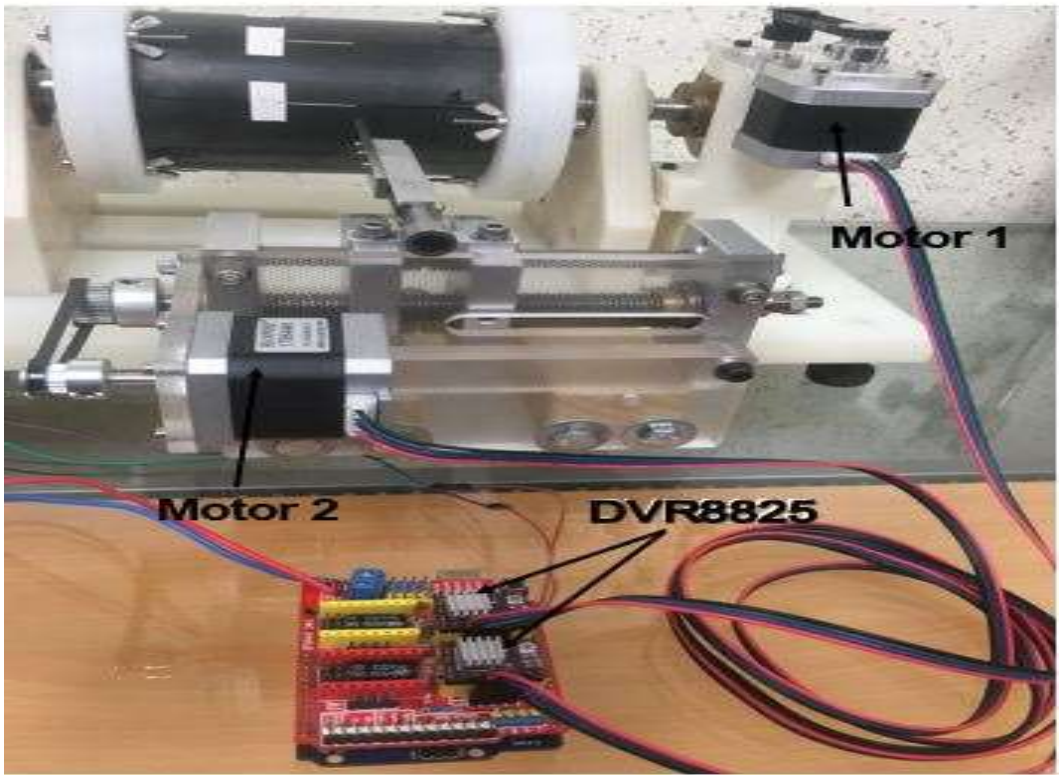


Figura 4.16. Conexión de los motores a pasos NEMA-17 con los dos drives DVR8825.

Los dos drive DVR8825 se montan sobre los zócalos del CNC Shield como se indica en la siguiente Figura 4.16.

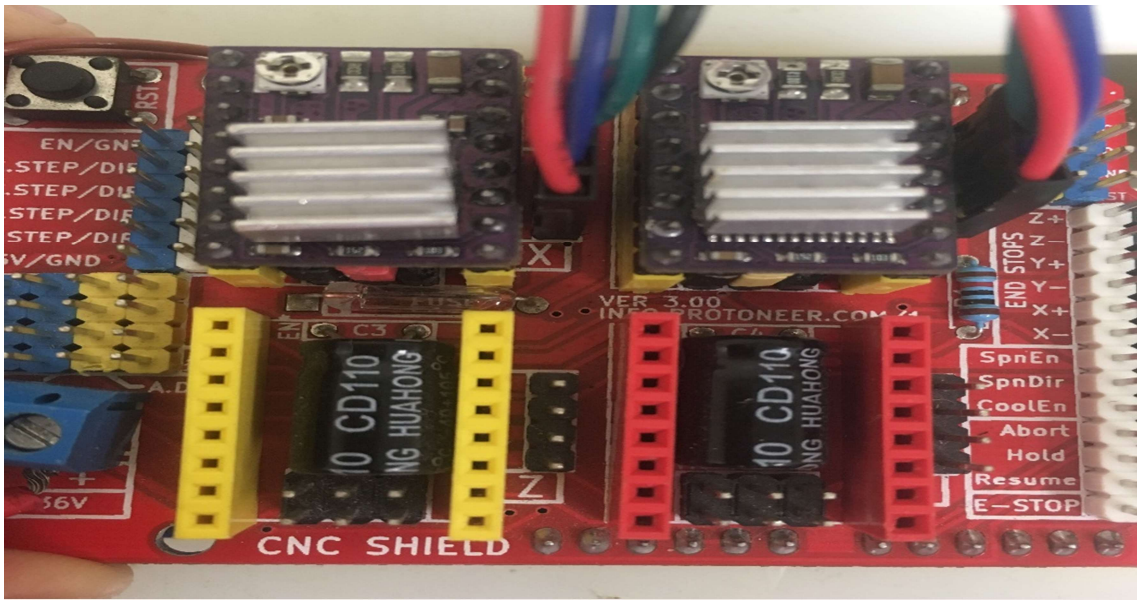


Figura 4.17. DVR8825 en tarjeta CNC Shield.

4.6.3 Tarjeta CNC Shield.

El CNC Shield para Arduino hace que se sea mucho más sencillo la conexión de varios motores en conjunto con los DRV8825. Esta tarjeta utiliza el firmware GRBL 0.8c de código abierto que se ejecuta en un Arduino, y convierte los comandos de código G en señales de eléctricas para mover en pasos los motores. Para controlar 4 motores paso a paso (PAP o stepper) 4 espacios compatibles para el uso de controladores de motores paso a paso (PAP) DRV8825 u otros compatibles como se muestra en la Figura 4.17.

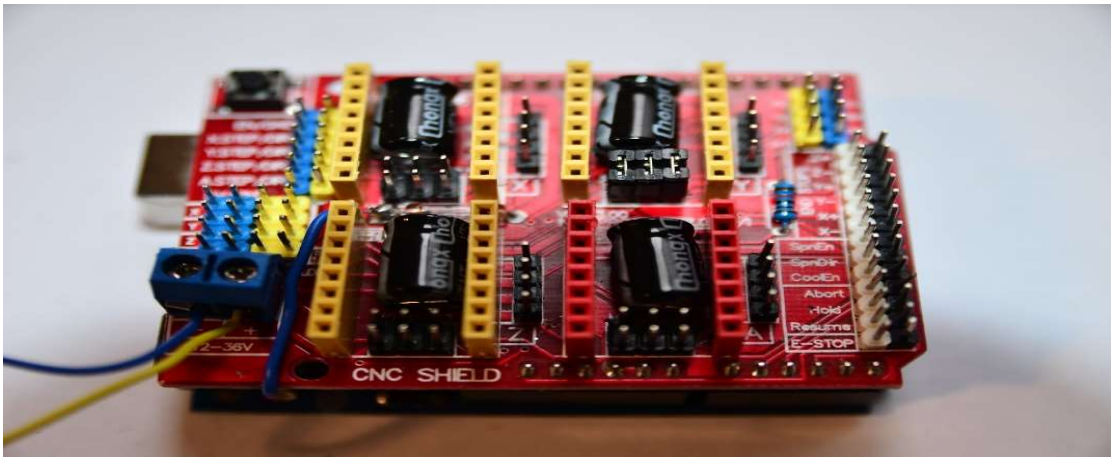


Figura 4.18. Tarjeta CNC Shield para Arduino.

También cuenta con puentes para ajustar el micro-escalonamiento de los pasos, permitiendo controlar de forma más precisa los motores (algunos controladores como el DRV8825 pueden hacer hasta 1/32 pasos). En cuanto a la conexión de los motores PAP esta tarjeta cuenta con molex de 4 pines, para conectarlos. Es preciso señalar que la alimentación para esta etapa de potencia es con un voltaje de entrada de 12 V, que puede variar entre 12-36 VDC (Por el momento solo los controladores DRV8825, soportan hasta 36V).

4.8 Sistema para la adquisición de datos.

La adquisición de datos consiste en el muestreo que se hace sobre el tubo ferromagnético en cada uno de los defectos, las señales adquiridas por el muestreo son reales (sistema analógico) el cual nos permitirá que estos datos sean adquiridos y generados para ser manipulados por un ordenar (PC) u otro dispositivo digital o sistema digital.

El sistema DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. El sistema para la adquisición de datos se muestra a continuación en la Figura 4.25.

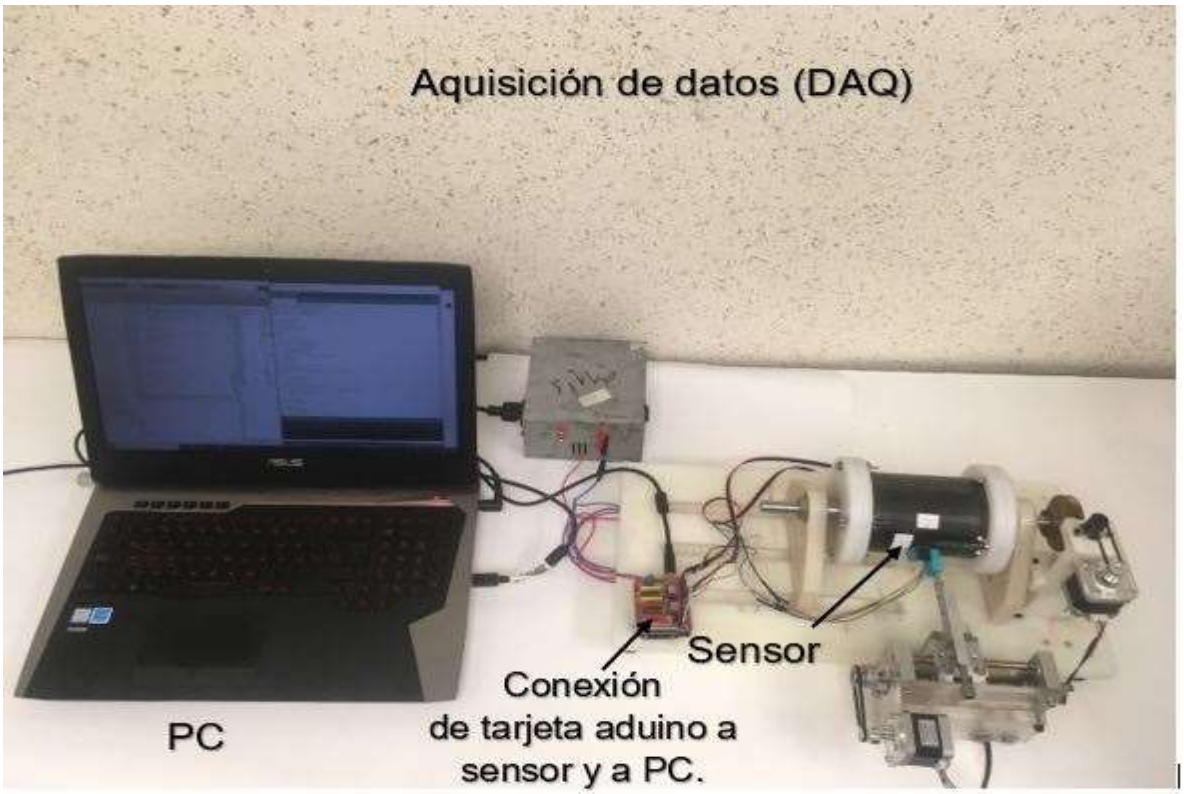


Figura 4.25. Sistema DAC que consiste en un sensor, hardware de medidas para la DAQ y una PC con software programable.

4.9 Programación de motores en Arduino.

Para la programación de los motores se realizó la conexión a la tarjeta Arduino para poder controlar la velocidad del movimiento de el tubo ferromagnético y así por medio del sensor poder adquirir las señales que corresponden a cada una de las grietas que se consideran en esta tesis de investigación.

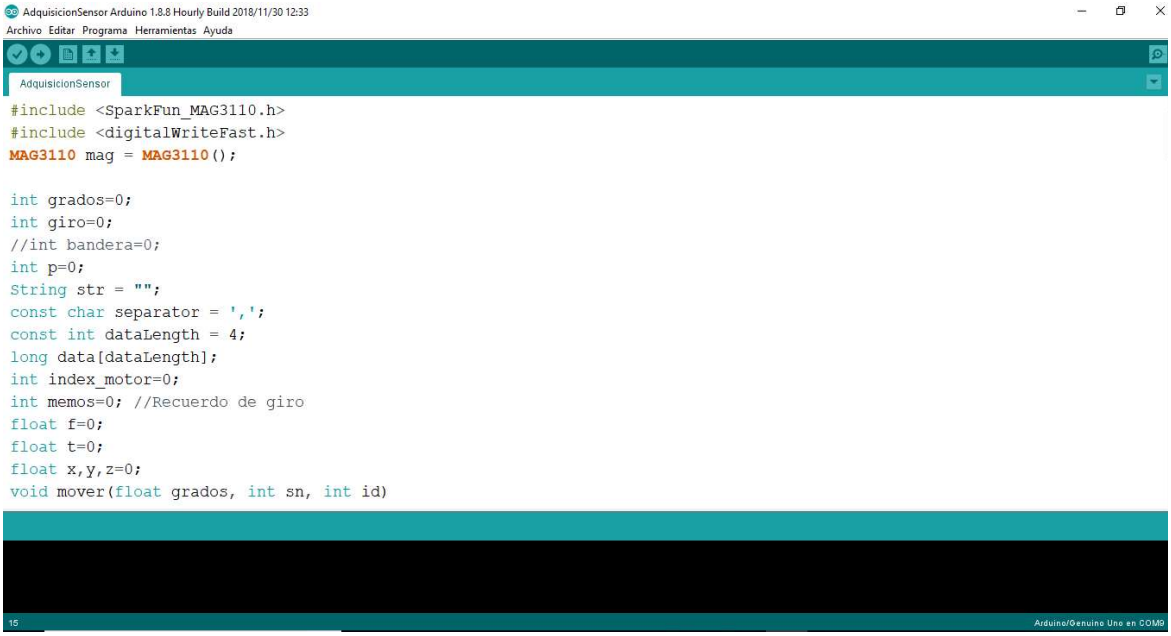


Figura 4.19. Asignacion de variables para la programacion de Motor 1 y Motor 2 NEMA-17 en Arduino.

Para la programación de los motores en Arduino es necesario considerar la velocidad a la cual los motores tienen una mejor respuesta para el movimiento del tubo en el sistema rotatorio (ver Figura 4.9.). De igual forma, se considera en la programación del motor a pasos el micro stepper que es el grado en los que se puede dividir un paso, esto nos ayuda a tener movimientos más pequeños de cada paso del motor.

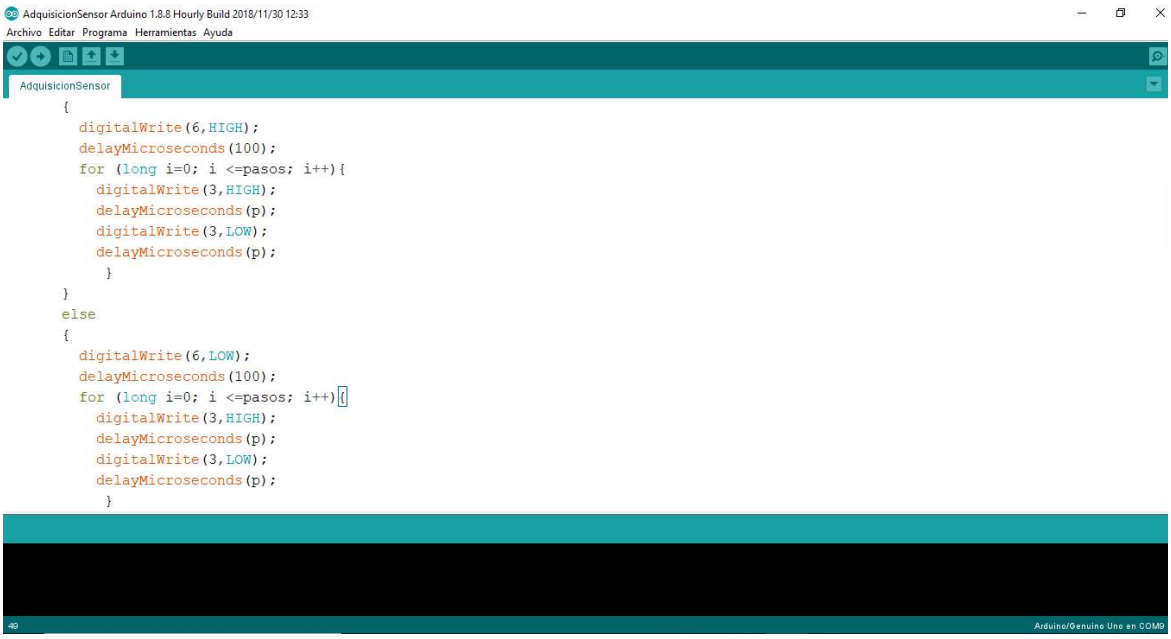


Figura 4.20. Asignacion de puestos para la programacion de Motor 1 en Arduino.

Es necesario que se asignen los puertos de entrada y salida para el control de dirección de cada motor. Esta programación para el motor 1 se muestra en la Figura 4.20 y para la programación del motor 2 se muestra en la Figura 4.21.

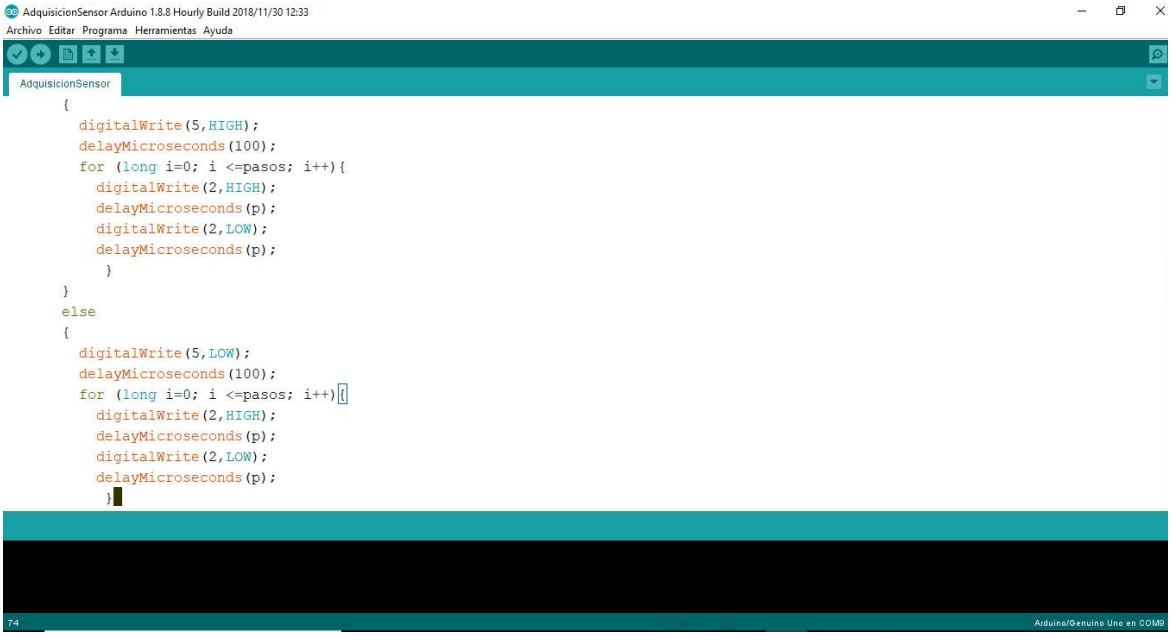


Figura 4.21. Asignacion de puertos para la programacion de motor 2 en Arduino.

```
AdquisicionSensor Arduino 1.8.8 Hourly Build 2018/11/30 12:33
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
AdquisicionSensor
    break;
  }
  digitalWrite(8, HIGH);
}

void setup() {
  // put your setup code here, to run once
  Serial.begin(9600);
  mag.initialize();
  mag.start();
  pinMode(8,OUTPUT); //Habilitar motor
  pinMode(6,OUTPUT); //Cambio de direccion de giro
  pinMode(3,OUTPUT);

  pinMode(5,OUTPUT); //Cambio de direccion
  pinMode(2,OUTPUT);
  /*
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(6, LOW);
  digitalWrite(7,HIGH);
74
Arduino/Genuino Uno en COM9
```

Figura 4.22. Asignación de puertos para habilitar, cambio de direccion de giro de Motor 1 y Motor 2 en Arduino.

Por medio de la interfaz de Arduino que se muestra en la Figura 4.23 y Figura 4.24 podemos asignar cuál de los motores se accionan ya sea para realizar el movimiento de manera radial (horizontal) de esto se encarga el Motor 1, es decir, rodear el tubo ferromagnético para que así el sensor pueda censar los defectos marcados o para accionar el Motor 2 de manera axial (vertical), es decir, que se mueva a lo largo del tubo ferromagnético. Para esta investigación los datos obtenidos son solo de manera radial.

```
AdquisicionSensor Arduino 1.8.8 Hourly Build 2018/11/30 12:33
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
AdquisicionSensor
    mag.readMicroTeslas(&x,&y,&z);
    Serial.print(x,5);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(y,5);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(z,5);
  }

  if (Serial.available()>0)
   {
      str = Serial.readStringUntil('\n');
      for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
      {
         int index = str.indexOf(separator);
         data[i] = str.substring(0, index).toFloat();
         str = str.substring(index + 1);
      }
      //delay(100);
74
Arduino/Genuino Uno en COM9
```

Figura 4.23. Programación de interfaz

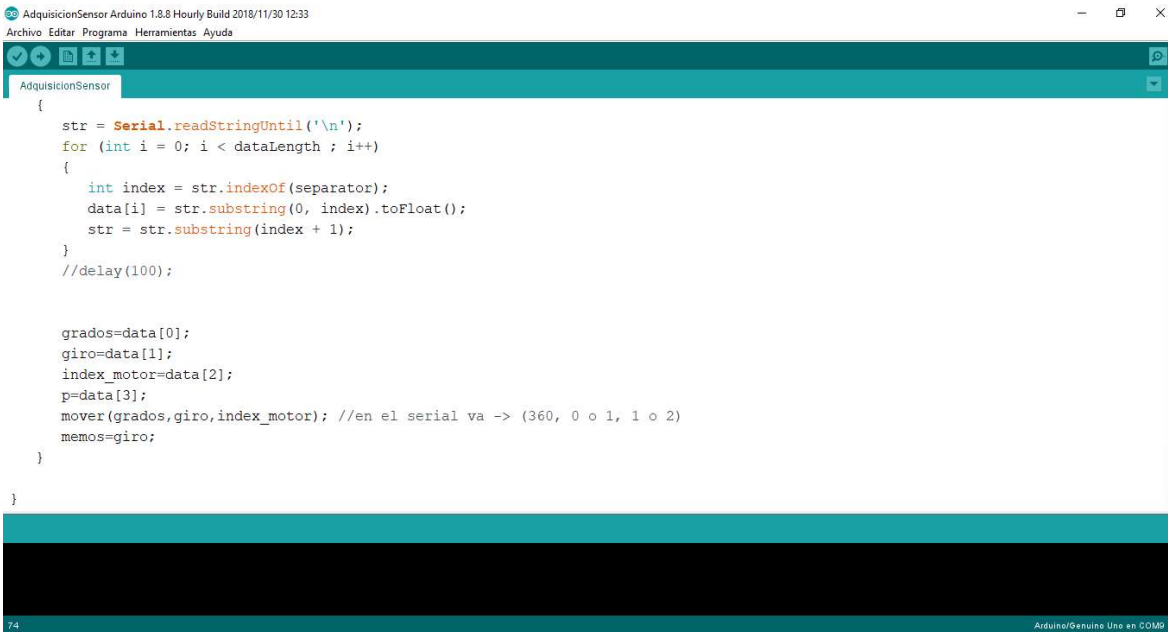


Figura 4.24. Asignación de datos para funcionamiento de motores (grados, dirección de motor derecha o izquierda, selección el motor 1 o motor 2).

La programación completa de los Motores 1 y 2 en Arduino y así como la adquisición de los datos se agregarán en el Anexo I.

4.10 Programación para adquisición de datos en Matlab.

La conexión entre la tarjeta Arduino y la PC para procesar los datos se realiza por medio de la programación en Matlap R2014a. Los datos generados por la adquisición de las señales son guardados en archivos con extensión .mat, las señales son adquiridas y procesadas en Matlab. El sensor detecta las componentes en los tres ejes axiales del campo magnético de fuga, su sensibilidad es la más adecuada. Al manipular nuestros datos obtenemos la medición del campo magnético medido en Teslas (mT) para los tres ejes *x, y z*. La programación completa para la adquisición de datos y procesamiento de las señales se muestra en el Anexo II.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En esta tesis se desarrolla un sistema para detección de grietas en tuberías ferromagnéticas, el cual toma en consideración un modelo integral para representar el campo magnético de fuga magnética en una grieta tipo V debido a la acumulación de dislocaciones en un material ferromagnético. El modelo del dipolo magnético se deriva de la distribución de la densidad de carga magnética lineal inducida por la concentración de tensión, asumiendo que esta densidad se distribuye linealmente.

Los resultados que muestran de cada una de las grietas que se midieron nos facilitan el entendimiento de la medición de grietas tempranas en tuberías ferromagnéticas o en algún material ferromagnético que ha sufrido algún daño por el ambiente de trabajo que le rodea o simplemente por la manera en que se creó dicho elemento. Todo esto puede provocar que el material llegue a tener defectos alrededor de él, se muestra que el modelo que se utiliza facilita las predicciones de daños tempranos en el tubo en base a la virtud de las señales de MMM. Entre el valor de Hyp de componentes tangenciales y el ancho Hzp-p entre la cresta de valor normal y el canal se proponen componentes como dos parámetros clave para determinar el grado de daño y rango del tamaño de grieta. Lo cual se investiga si la profundidad de cada grieta tiene una variación considerable en el campo magnético que se refleja en los resultados de cada gráfica. Además, que la combinación de los componentes normales junto con los tangenciales es utilizados para la detección de grietas en tuberías con el menor valor de distancia de despegue posibles del sensor hacia el material que contiene la grieta ya que la menor distancia de despegue mejora la precisión y confiabilidad del método MMM.

REFERENCIAS

Bonik, A., & Roskosz, M. (2009). *A. Metal magnetic memory testing of welded joints.* Poznan Lichen: Proceeding of the 38th national conference on non-destructive testing.

Bozorth, R., & Chapin, D. (1942). Demagnetizing factors of rods. *Journal Applied Physics*.

Chen, X., & Liu, Y. (2014). Finite element modeling and simulation ansys worbench. *CRC Press*.

Dubov, A. A. (1995). Diagnostics of boiler tubes with usage of metal magnetic memory . *Energoatomizdat* , 112.

Dubov, A., & Kolokolnikov, S. (2014). Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts. *World 58*, 225-236.

Dutta, S. M. (2008). *Magnetic Flux Leakage Sensing: The Forward and Inverse Problems.* Rice, Texas.: PhD thesis.

Feigenbaum, E. A. (1977). *The art of Artificial Intelligence.* Stanford, CA.: Defense Advanced Research Projects Agency .

Giarratano, J., & Riley, G. (2001). *Sistemas expertos. Principios y programación.* Tompson.

Hunt , F. V. (1954). *Electroacoustics.* Cambridge, Ma,: Harvard University Press.

Kittel, C. (1990). *Introduction to solid state physics.* Wiley, N.Y.

Landau, L., & Lifchitz, E. (1969). *Electrodynamique des miliex continus.* Mir, Moscu.

Maxwell, J. (1891). *A Treatise on Electricity and Magnetism, vol. II .* Drover, third edition ed.

Roberto, B., & Mitsudori, D. (1988). The interaction between a crack and a dislocation dipole. *International Journal of Fracture, vol 37, No. 1*, 61-71.

Suarez Antola, R., Vedovatti, E., & Zirnhelt, J. (August 2014). Magnetic Memory Method, a critical review. *Montreal Word Conference on Non-Destructive Testing* .

Suárez-Ántola , R., & Suárez-Bagnasco, D. (2014). The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT. *Segundas Jornadas Técnicas de La Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos*.

Villegas Saucillo, J. J., Diaz Carmona, J. J., & Herrera May, A. L. (2016). Supervisión de Salud Estructural Nuevos Métodos Mágneticos. *Elemento*, 19-23.

Vlasov, V. T. (2003). Physical base of the method of metal magnetic memory-own magnetic field of dislocations. *3rd International Conference on Diagnostics of Equipment and Structures using the Magnetic Memory Method*.

Zhong, L., Li, L., & Chen, X. (2008). Progress in Nondestructive Evaluation of Stress Concentration with MMM Method. *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 25-28.

ANEXO I

```
#include <SparkFun_MAG3110.h>

#include <digitalWriteFast.h>

MAG3110 mag = MAG3110();


int grados=0;

int giro=0;

//int bandera=0;

int p=0;

String str = "";

const char separator = ',';

const int dataLength = 4;

long data[dataLength];

int index_motor=0;

int memos=0; //Recuerdo de giro

float f=0;

float t=0;

float x,y,z=0;

void mover(float grados, int sn, int id)

{

  int bandera=0;

  long pasos=0;

  pasos=8*(grados/1.8);

  digitalWrite(8, LOW); //Para habilitar motor

  delayMicroseconds(20);


  switch(id)

  {

    case 1:

      if(sn==1)
```

```
  {
    digitalWrite(6,HIGH);
    delayMicroseconds(100);
    for (long i=0; i <=pasos; i++){
      digitalWrite(3,HIGH);
      delayMicroseconds(p);
      digitalWrite(3,LOW);
      delayMicroseconds(p);
       }
  }
  else
  {
    digitalWrite(6,LOW);
    delayMicroseconds(100);
    for (long i=0; i <=pasos; i++){
      digitalWrite(3,HIGH);
      delayMicroseconds(p);
      digitalWrite(3,LOW);
      delayMicroseconds(p);
       }
  }
break;

case 2:
  if(sn==1)
  {
    digitalWrite(5,HIGH);
    delayMicroseconds(100);
    for (long i=0; i <=pasos; i++){
      digitalWrite(2,HIGH);
```

```
        delayMicroseconds(p);
        digitalWrite(2,LOW);
        delayMicroseconds(p);
         }
      }
      else
      {
        digitalWrite(5,LOW);
        delayMicroseconds(100);
        for (long i=0; i <=pasos; i++){
          digitalWrite(2,HIGH);
          delayMicroseconds(p);
          digitalWrite(2,LOW);
          delayMicroseconds(p);
           }
      }
    break;
  }
  digitalWrite(8, HIGH);
}

void setup() {
  // put your setup code here, to run once
  Serial.begin(9600);
  mag.initialize();
  mag.start();
  pinMode(8,OUTPUT); //Habilitar motor
  pinMode(6,OUTPUT); //Cambio de direccion de giro
  pinMode(3,OUTPUT);
```

```
  pinMode(5,OUTPUT); //Cambio de direccion
  pinMode(2,OUTPUT);
  /*
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(6, LOW);
  digitalWrite(7,HIGH);
  */

  digitalWrite(8, HIGH);
  //Serial.println("Hola Tai");
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  delay(50);
  if(mag.dataReady()==1)
  {
    /*if(mag.dataReady()==1){
      mag.readMicroTeslas(&x,&y,&z);
      Serial.print(x,5);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(y,5);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(mag.dataReady());
      Serial.print(" ");
      Serial.println(z,5);
      break;
    }*/
    mag.readMicroTeslas(&x,&y,&z);
    Serial.print(x,5);
```

```
    Serial.print(" ");
    Serial.print(y,5);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(z,5);
  }

 if (Serial.available()>0)
  {
     str = Serial.readStringUntil('\n');
     for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
     {
        int index = str.indexOf(separator);
        data[i] = str.substring(0, index).toFloat();
        str = str.substring(index + 1);
     }
     //delay(100);



     grados=data[0];
     giro=data[1];
     index_motor=data[2];
     p=data[3];
     mover(grados,giro,index_motor); //en el serial va -> (360, 0 o 1, 1 o 2)
     memos=giro;
  }

}
```

ANEXO II

```
clear,clc,close all

D=90; %Diámetro del tubo en mm
L=20; %Longitud del maquinado de X en mm
La=20; %Longitud del arco a recorrer en mm

n=200; %número de muestras a adquirir radialmente
m=0; %número de repeticiones toma de muestras en el eje X

r=1.8/(8*102);
Am=pi*D*r/(360*1000);
rx=1.8/(8*(33/20));
Lm=rx*1.2/(360*1000);

da=La/(n*1000);
dx=L/(m*1000);

X=zeros(n,m);
Y=zeros(n,m);
Z=zeros(n,m);
Arc=zeros(n,m);
Dis=zeros(m);
arco=0;
canal_serie=serial('COM3','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
set(canal_serie,'Timeout',100);

fopen(canal_serie);
flushinput(canal_serie);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Reducción de rotación 102
m1=da*360*102/(pi*D/1000); %Diferencial de grados
M1=0;
m2=dx*360*1000/1.2;
M2=0;
if Lm<=dx && Am<=da
%     i=1; j=1;
for i=1:m+1
  for j=1:n+1
    coor=[num2str(m1) ',' '1' ',' '1' ',' '1000'];
%     disp(coor)
    flushinput(canal_serie);
%             disp('Hola')
    datos=fscanf(canal_serie,'%f %f %f',[1 3]); %Recibir datos
%             disp('Hola2')
    fprintf(canal_serie,coor); %Mandar dato
    pause(0.6); %%Tiempo para que el motor gire
    X(j,i)=datos(1);
```

```
    Y(j,i)=datos(2);
    Z(j,i)=datos(3);
    Arc(j,i)=arco;
    M1=M1+m1;
    arco=arco+pi*D*m1/(360*1000*102);
%            j=j+1;


%     disp('Entro a m1')
    disp(j)
  end
%         j=0;


    coor=[num2str(M1) ',' '2' ',' '1' ',' '150'];
%         disp(coor)
    fprintf(canal_serie,coor);
    pause(30);
    M1=0;

    Dis(i)=M2;
    flushinput(canal_serie);
    M2=M2+m2;
    coor=[num2str(m2) ',' '2' ',' '2' ',' '1000'];
%         disp(coor)
    fprintf(canal_serie,coor);
    pause(5);
    flushinput(canal_serie);
%         i=i+1;
    disp('Entro a m2')
 end
    coor=[num2str(M2) ',' '1' ',' '2'',' '150'];
%     disp(coor)
    fprintf(canal_serie,coor);
    pause(3);
    disp('Termino')
else
    disp('Ingrese un numero de muestras menor para arco o para longitud')
end

fclose(canal_serie);
delete(canal_serie);
clear canal_serie


figure
plot(Arc(:,1)*1000,X(:,1))
figure
plot(Arc(:,1)*1000,Y(:,1))
```

```
figure
plot(Arc(:,1)*1000,Z(:,1))

save Prueba500_1 % se guarda al señal adquirida
```

ANEXO III
Componente Tangencial (HY) en Matlap

```
clc; clear
z=0;
b=1;
x=2;
cte=2*pi*4*pi*10e-4;

y1 = (-20:1:50);
a1= (0.5:0.5:2.5);

for j=1:length(a1)
   a = a1(j);
    for i=1:length(y1)
        y=y1(i);
        fun = @(m) (12.665 *(y-
m)*(a^2*m^2+2*a^2*m+a^2+m^2+2*m+1)^1/2)/(a^2*m^2+2*a^2*m+a^2+m^2-
2*m*y+y^2+4);
        q1(j,i)= integral(fun,-b,0,'ArrayValued',true);

    end

%     plot(y1,q1(j,:),'g')
%     hold on

end

for j=1:length(a1)
   a = a1(j);
    for i=1:length(y1)
        y=y1(i);
        fun = @(m) (12.665 *(y-m)*(a^2*m^2-2*a^2*m+a^2+m^2-
2*m+1)^1/2)/(a^2*m^2-2*a^2*m+a^2+m^2-2*m*y+y^2+4);
        q2(j,i)= integral(fun,0,b,'ArrayValued',true);

    end

     F3=(q1(j,:)-q2(j,:));
        plot(y1,F3);
        hold on

% plot(y1,q2(j,:),'r')
% hold on

end
```

Componente normal (HZ) en Matlap.

```
clc; clear
z=0;
b=1;
x=2;
cte=2*pi*4*pi*10e-4;

y1 = (-20:1:20);
a1= (0.5:0.5:2.5);

for j=1:length(a1)
   a = a1(j);
    for i=1:length(y1)
        y=y1(i);

        fun = @(m) (25.33*(a^2*m^2+2*a^2*m+a^2+m^2+2*m+1)^(1/2))  /   ( a^2 *
m^2 + 2*a^2*m+a^2+m^2-2*m*y+y^2+4);
        q1(j,i)= integral(fun,-b,0,'ArrayValued',true);



    end

%    plot(y1,q1(j,:),'g')
% %  hold on
end



for j=1:length(a1)
   a = a1(j);
   for i=1:length(y1)
        y=y1(i);
        fun = @(m) (25.33*(a^2*m^2-2*a^2*m+a^2+m^2-2*m+1)^(1/2))/( a^2 * m^2 -
2*a^2*m+a^2+m^2-2*m*y+y^2+4);
        q2(j,i)= integral(fun,0,b,'ArrayValued',true);


   end
%  plot(y1,q2(j,:),'m')
%  hold on
        F3=(q1(j,:)-q2(j,:));
        plot(y1,F3);
        hold on
end
```

ACADEMIA JOURNALS

OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

CENTRO PANAMERICANO DE ESTUDIOS SUPERIORES

2109

CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN DE ACADEMIA JOURNALS MORELIA 2018

ACADEMIAJOURNALS.COM

CERTIFICADO

OTORGADO A

M.C. J. JESÚS VILLEGAS-SAUCILLO
ING. TAI SAY PUON-DE LA CRUZ
M.T.I. OSCAR LUIS PEÑA-VALERIO
DR. JOSÉ JAVIER DÍAZ-CARMONA
DR. CARLOS ARTURO CERÓN-ÁLVAREZ

POR SU ARTÍCULO INTITULADO

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO DE UN DEFECTO SUPERFICIAL RECTANGULAR DE UNA PLACA FERROMAGNÉTICA USANDO EL MÉTODO DE MEMORIA MAGNETICA

EL CUAL FUE PRESENTADO EN EL CONGRESO DESARROLLADO DEL 16 AL 18 DE MAYO DE 2018 EN MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO Y PUBLICADO EN EL PORTAL DE INTERNET *ACADEMIAJOURNALS.COM*, CON ISSN 1946-5351 ONLINE, VOL. 10#3, 2018 Y EN EL LIBRO ELECTRÓNICO ONLINE TITULADO *COMPENDIO DE INVESTIGACIÓN MORELIA 2018* CON ISBN 978-1-939982-36-0

RAFAEL MORAS, PH.D. P.E
EDITOR, ACADEMIA JOURNALS

RECTOR ALDO EMILIO TELLO CARRILLO
CENTRO PANAMERICANO DE ESTUDIOS SUPERIORES

Artículo More624

Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación
Gobierno del Estado de Michoacán

Universidad Nova Spania

CFE
Comisión Federal de Electricidad

CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE
Subgerencia de Ingeniería

Dos Bocas, Ver., 01 de Marzo de 2019

CARTA DE COLABORACIÓN CON LA MAESTRÍA DE INGENIERÍA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA.

COORDINACIÓN DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA
UNIVERSIDAD VERACRUZANA
Presente

Por medio de la presente hacemos constar que Tai-Say Puón De la Cruz colabora con la Maestría en Ingeniería Aplicada en la modalidad de profesionalizante, con el proyecto de vinculación industrial que se desarrolla con la tesis "Detección de grietas en tuberías por medio del método de memoria magnética".

En el tenor de esta carta, hacemos de su conocimiento que seguimos interesados en continuar con esta vinculación existente con su programa de posgrado, proporcionando los medios de interacción con los Ingenieros líderes de sus proyectos, reconociendo que esta acción podría beneficiar a nuestra empresa.

ATENTAMENTE

ING. ZURY DILIANA DÍAZ PAVÓN