

Diseño de Prototipo de Laboratorio para Detección de Fallas en Coiled Tubing Mediante Dispersión de Flujo Magnético

Marcelo L. Moreyra, *Student Member, IEEE*
Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén.
Email: marcelo_moreyra@ieee.org

Resumen – En este trabajo se diseñó e implementó un prototipo de herramienta de laboratorio para la detección de fallas en tuberías de Coiled Tubing (CT) basado en la técnica no destructiva de Dispersión de Flujo Magnético. Se describen todas las etapas del diseño y los resultados finales obtenidos. Por último, se proponen una serie de propuestas de mejora y trabajos a futuro para incrementar la capacidad de detección del sistema.

Palabras clave – Dispersión de Flujo Magnético, MFL, Coiled Tubing, Ensayos No Destructivos.

Abstract – In this work, a laboratory prototype tool for Coiled Tubing (CT) failure detection based on Magnetic Flux Leakage non destructive technique was designed and implemented. All design stages and obtained final results are described. Finally, many improvement and future work proposals for increasing the system detection capability are made.

Key words – Magnetic Flux Leakage, MFL, Coiled Tubing, Non Destructive Testing.

I. INTRODUCCIÓN

El CT consiste en una tubería metálica continua y flexible, fabricada de una aleación de acero al carbono de alta resistencia y baja aleación que está clasificada según normas ASTM como A-606 tipo 4. Esta aleación especial le provee gran flexibilidad y mayor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono comunes [1]. Para su conservación y transporte, la tubería se almacena arrollada sobre un carretel. Las longitudes de las tuberías pueden ser superiores a los 6000m, según el tamaño del carretel y los diámetros de éstas, que oscilan entre $\frac{3}{4}$ " y $4\frac{1}{2}$ ".

Posee importantes ventajas frente a la tradicional tubería roscada, ya que no es necesario manipularla ni estibarla tramo por tramo para bajarla o retirarla de un pozo, debido a que se la enrolla y desenrolla como si fuese una manguera. Las ventajas más importantes son: mayor rapidez de operación, más fácil almacenaje, menor requerimiento de personal, mayor seguridad al operar y principalmente una reducción de costos de operación. Sus aplicaciones más importantes son el bombeo y perforación de pozos dirigidos, la estimulación y limpieza de pozos, además de la terminación y reparación de los mismos, entre otras [2].

Durante las operaciones de campo, las tuberías de CT son expuestas a severas condiciones de trabajo, como deformaciones plásticas, corrosión y desgaste [3]. Debido a esto, la tubería tiene una cierta vida útil, que dependerá principalmente del material con que se ha fabricado, del tipo de servicio realizado, de los esfuerzos mecánicos a los que ha sido sometida y del número de ciclos de arrollamiento. A pesar de que estos sucesos se consideran para estimar su período de

utilidad suelen aparecer discontinuidades como fisuras o grietas transversales (perpendiculares al eje del tubo), e imperfecciones tridimensionales tales como picaduras o más conocidas como "pittings", consecuencia de la fatiga acumulada y la presencia de corrosión respectivamente, que pueden causar la rotura y/o pérdida de una tubería. Este tipo de eventualidades ocasiona grandes trastornos operativos, atentan contra la seguridad de las personas y del medio ambiente, y son motivo de cuantiosas pérdidas económicas.

Dado el elevado costo que tiene un potencial accidente, es imperiosa la necesidad de realizar tareas preventivas de inspección, durante o después de un servicio, con el objeto de evaluar el nivel de deterioro de las piezas. Con este propósito nos valemos de los Ensayos No Destructivos (END), que consisten básicamente en métodos y técnicas de inspección de materiales que no alteran ni las propiedades ni la aptitud para el servicio de los mismos [4].

El objetivo de este trabajo es el diseño e implementación de un prototipo de laboratorio para la detección de grietas transversales e imperfecciones tridimensionales en tuberías de CT a través de técnicas END. Para esto se ha utilizado la técnica de Dispersión de Flujo Magnético, la cuál se ha adaptado y aplicado a nuestro caso. La escasez en la región de este tipo de herramienta para su utilización en campo ha promovido la realización de este trabajo.

II. INPECCIÓN DEL CT CON END

A. Especificaciones de la herramienta

Los requisitos para el diseño tienen estrecha relación con las condiciones reales de inspección a que se sometería la herramienta durante una operación. Resumidamente:

- Inspección en línea y en tiempo real, es decir, a medida que la tubería es inyectada o recuperada de un pozo.
- Exploración de la superficie de la tubería desde el exterior, dada la imposibilidad práctica de hacerlo por dentro de la misma.
- Robustez mecánica e inmunidad a las condiciones de inspección en campo (principalmente suciedad).

B. La Técnica de Inspección

El ensayo por Dispersión de Flujo Magnético (en inglés, *Magnetic Flux Leakage* o MFL) es una de las técnicas más antiguas y quizás la más comúnmente utilizada para la inspección de materiales ferromagnéticos como tanques, tuberías y gasoductos, en búsqueda de pérdidas de material, fisuras y defectos [4, 5, 6]. Su principio de operación se basa en la aplicación de un campo magnético H intenso al material a

examinar y la medición, sobre la superficie, de la dispersión del primero. La existencia de una discontinuidad provoca la aparición de dipolos magnéticos locales que distorsionan el campo en cercanías de la misma (Fig. 1). El campo adicional de fuga generado puede medirse con sensores magnéticos y depende principalmente de las propiedades del material, de la intensidad H , de la geometría de la discontinuidad y de la posición del sensor respecto de la misma [7, 8].

Según la componente vectorial que se mida del campo, las señales MFL difieren significativamente. En nuestro caso, definiremos dos posibles direcciones de medición: la dirección tangencial y la dirección perpendicular (Fig. 1).

Las ventajas que posee MFL frente a otras técnicas para inspección en línea son, entre otras:

- Se evita el contacto físico con la pieza a inspeccionar.
- Inmunidad a la suciedad en la superficie de la pieza.
- Los sensores magnéticos son más accesibles y de menor costo; la resolución de éstos no depende de su tamaño.

III. DISEÑO DEL SISTEMA MFL

En general, todo sistema MFL está compuesto por cuatro etapas básicas: magnetización, detección, procesamiento y visualización de las señales medidas (Fig. 2). En esta sección, describiremos el diseño de nuestro sistema de magnetización (etapa 1) y el sistema de adquisición de datos (etapas 2, 3 y 4).

A. Sistema de Magnetización

Para que discontinuidades de idénticas características en diferentes lugares de la superficie del CT, generen un escape de campo de valores idénticos, el campo magnético aplicado debe ser uniforme en toda la sección de tubería que se está examinando y constante en el tiempo. Esto permite que los parámetros (como la amplitud y frecuencia) de las señales medidas sean invariantes y guarden una relación más estrecha con la geometría de la discontinuidad (mejor caracterización).

Existen varias formas de generar este campo: imanes permanentes, electroimanes y bobinas inductoras. Sin embargo, la geometría del tubo es circular y la complejidad del diseño de un imán o electroimán que genere un campo uniforme en toda esa geometría es elevada. Por lo tanto, y además por cuestiones de costo, se optó por la utilización de dos bobinas inductoras colocadas alrededor de la tubería y separadas entre sí cierta distancia, a determinar (Fig. 3). Con esto se pretende generar dos polos magnéticos (como los de un electroimán) entre los cuales se pueda colocar los sensores adecuados.

Se determinó que la corriente que circule por los bobinados sea DC de forma que las líneas de campo se distribuyan uniformemente dentro de toda la pared del material. A diferencia que con AC (con la que las líneas de campo se concentran en la superficie) pueden detectarse defectos internos y subsuperficiales, además de los superficiales.

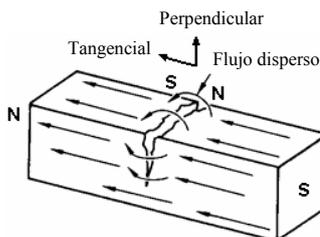


Fig. 1 – Principio de operación de MFL.

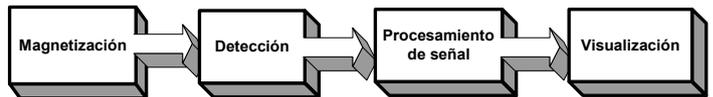


Fig. 2 – Diagrama esquemático de un sistema MFL.

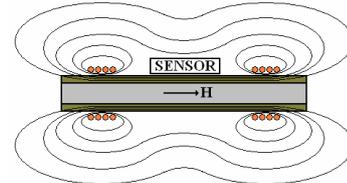


Fig. 3 – Diagrama esquemático de nuestro sistema de magnetización.



Fig. 4 – Discontinuidades artificiales.

Por otro lado, para maximizar la probabilidad de detección de una discontinuidad, las líneas de flujo magnético deben ser lo más perpendicular posible a la mayor dimensión de la misma. Con estos bobinados se cumple este requisito; las grietas transversales interrumpen el camino del flujo y se genera un mayor escape de campo que si la magnetización tuviera una dirección diferente a la del eje del tubo.

Finalmente, el aspecto quizás más importante a tener en cuenta es que la intensidad de H sea la suficiente para provocar la fuga de campo. El nivel óptimo es aquel para el cual la densidad de líneas de campo B dentro del material es máxima, es decir, para el que la permeabilidad magnética μ del tubo es máxima. Este punto se encuentra cercano al codo de saturación de la curva de magnetización del CT, para la cual se cumple:

$$\mu(H) = \frac{B(H)}{H} \quad (1)$$

El valor de saturación del tubo H_s no se conocía a priori por lo que para poder hallarlo se realizaron una serie de experimentos, que se describen a continuación.

1) Experimentos preliminares,

La configuración experimental que se utilizó consistió en un tramo de CT de 1 1/4" de diámetro y 2m de longitud (dimensiones de una de las muestras disponibles), dos bobinas de 13cm de longitud y 540 vueltas cada una, un sistema mecánico (permite el movimiento del tubo por dentro de las bobinas), una resistencia de potencia (para limitar la corriente), una fuente regulable DC, y el sensor de efecto Hall PASCO CI-6520 junto con su interfaz a PC y software asociado.

El objetivo de las experiencias era observar el comportamiento de B sobre la superficie de la tubería y en cercanías a tres discontinuidades artificiales previamente maquinadas sobre la misma (Fig. 4), a medida que ésta se desplazaba por dentro de las bobinas separadas a una distancia arbitraria de 20cm. El sensor se ubicó entre ellas, a 10cm de cada una y a 3mm aproximadamente de la superficie del caño, y se midió tanto la componente tangencial como normal del campo para distintos grados de magnetización.

Algunos de los resultados obtenidos se ilustran en la Fig. 5. Todas estas mediciones se realizaron a una frecuencia de muestro de 250Hz. Debido a una incapacidad práctica de mantener constante la velocidad de desplazamiento del tubo no podemos definir el eje de abscisas como la ubicación de las discontinuidades respecto a un eje de referencia en la pieza.

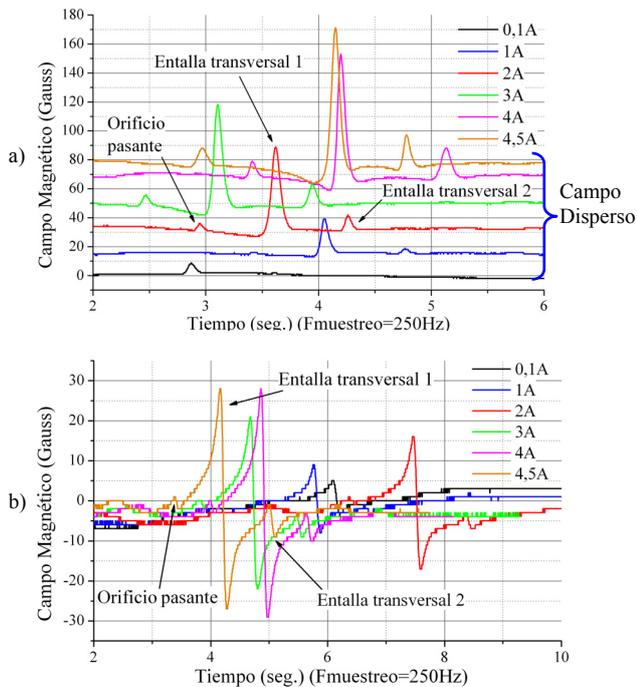


Fig. 5 – Resultados obtenidos en las experiencias preliminares. a) Componente tangencial; b) Componente perpendicular.

Pueden observarse claramente las variaciones del campo que se producen debido a cada una de las discontinuidades, las cuáles se encuentran indicadas en dicha figura. El máximo escape de campo se obtiene, para ambas componentes, para aproximadamente una corriente de entre 4A y 4,5A.

Las señales obtenidas midiendo la componente tangencial tienen un nivel constante adicional que denominaremos “campo disperso”, cuyo valor aumenta a medida que incrementamos la corriente. Si observamos nuevamente el patrón del campo de la Fig. 3, es de esperar que esto sea de este modo, pues siempre existirán líneas de campo en esa dirección debido al método de magnetización elegido. Asimismo, este nivel dependerá de parámetros como el factor de llenado de las bobinas, su longitud y la posición del sensor. Este nivel de fondo es indeseable y hace necesario la utilización de sensores con un amplio rango de medición. Esto es una desventaja ya que, por cuestiones de resolución, los dispositivos más sensibles tienen un rango estrecho de medición.

Sin embargo, la componente perpendicular del campo es nula en el centro entre bobinas, pues se cancelan las componentes generadas por cada una de ellas. Ésto se verifica en las experiencias, donde las señales tienen un nivel de campo disperso prácticamente nulo (Fig. 5b). Las posibles causas por las cuales este nivel no es totalmente nulo son principalmente dos: el sensor puede no haber estado exactamente en el centro y las bobinas no tienen dimensiones exactamente iguales.

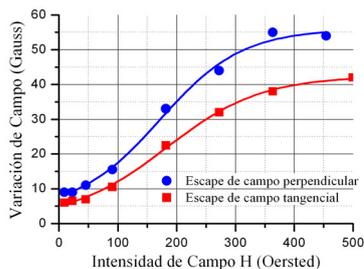


Fig. 6 - Estimación de la saturación de la cañería.

Por estas razones, se determinó que el prototipo a construir se base en la medición de la componente perpendicular del campo y que los sensores se encuentren ubicados en la zona central entre bobinas donde el campo disperso se anula.

2) Estimación de la saturación del CT,

La intensidad de campo H entre dos bobinas iguales, separadas entre sí cierta distancia D , está dada por:

$$H = k \cdot \frac{N \cdot i}{d_m} \quad (2)$$

Donde d_m es el diámetro medio de las bobinas, N es el número de espiras de cada una, i es la corriente que circula por cada una y k es una constante que depende de D .

Con el propósito de obtener el valor de “ k ” de la ecuación anterior, se utilizó un software de elementos finitos (FEM)¹. Se calculó numéricamente H entre dos bobinas de dimensiones iguales a las utilizadas en las experiencias recién descritas y un tramo de cañería, para una distancia de 20cm entre ellas.

Se obtuvo que la magnetización en el centro es 63% menor ($k=0,74$) que la que habría con las dos bobinas una a continuación de la otra ($D=0$ cm). Una vez obtenida esta relación entre H e i , se midió la amplitud de la señal de escape de campo debida a la entalla 1 para cada valor de magnetización (éstos son los valores pico a pico de las mediciones observadas en la Fig. 5 para la entalla 1) y se los graficó en función de fuerza magnetizante H , haciendo uso de (2) con $d_m=5,5$ cm, $N=540$ y $k=0,74$ (Fig 6).

Se puede observar como el escape de campo tiende a estabilizarse en un valor a medida que aumenta la intensidad de magnetización. Podemos estimar el valor de saturación como el mínimo valor de H que cumpla:

$$\left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_{H=H_s} \cong \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{H=H_s} \leq \frac{0,05 \cdot B(H_s)}{100} \wedge \frac{\partial^2 B}{\partial H^2} < 0 \quad (3)$$

Aplicando (3) en la Fig. 6 se puede concluir que la tubería satura aproximadamente a 400 Oersted, valor similar al encontrado en bibliografía para una cañería de CT-90 [9].

B. Sistema de adquisición

Los sensores a utilizar son los KMZ10A de Philips. Estos dispositivos son magnetorresistivos (MR) y se basan en una delgada película de permalloy que tiene la propiedad de variar su resistividad ante la presencia de un campo magnético.

Estos sensores MR son por naturaleza biestables por lo que se utilizó una técnica de estabilización denominada ‘flipping’ (comparable al conocido ‘chopping’). Esta técnica no solo estabiliza el sensor sino que también elimina los efectos de offset, campos internos remanentes e histéresis magnética, mediante un permanente “reseteo” del dispositivo [10,11].

El diagrama en bloques del sistema de adquisición se presenta en la Fig. 7. A través del generador de PWM del microcontrolador y un amplificador de corriente se generan los pulsos de corriente necesarios para la técnica de flipping. La señal amplificada y filtrada de cada sensor es muestreada a través del módulo conversor A/D del microcontrolador, que se encarga además de enviar vía RS232 los datos de la medición a la PC. La visualización en tiempo real y el almacenamiento en

¹ En la sección IV se describirá detalladamente el modelo numérico utilizado.

forma tabular de las señales medidas se realizan a través una aplicación de Visual Basic.

IV. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO PRELIMINAR

El siguiente análisis tuvo como objetivo estudiar el comportamiento del modelo experimental de la sección III.A.1 frente a variaciones en los parámetros del mismo para hallar la configuración óptima que maximice su sensibilidad, la cuál hemos definido como la capacidad del sistema de detectar una discontinuidad. Para maximizarla es necesario que la fuga de campo frente a una misma discontinuidad sea máxima, independientemente del tipo de sensor utilizado y los circuitos acondicionadores de señal. Asimismo, este estudio ha contribuido a una mejor comprensión de los fenómenos físicos implicados y como soporte a los resultados experimentales.

Se procedió a la resolución con FEM de las ecuaciones de Maxwell para el caso magnetostático (corriente continua):

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Donde J es la densidad de corriente libre. La densidad de flujo puede escribirse en términos del vector potencial magnético A como sigue:

$$B = \nabla \times A \quad (5)$$

Considerando (1) y (5) podemos reescribir (4) como:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times A \right) = J \quad (6)$$

Existe gran número de herramientas desarrolladas para resolver este problema particular; aquí se ha utilizado el software *Femm v3.3*. Para la geometría axisimétrica de nuestro problema el vector A tiene una sola componente, por lo que se reduce la complejidad del cálculo. Una vez calculado A , pueden hallarse B y H derivando A .

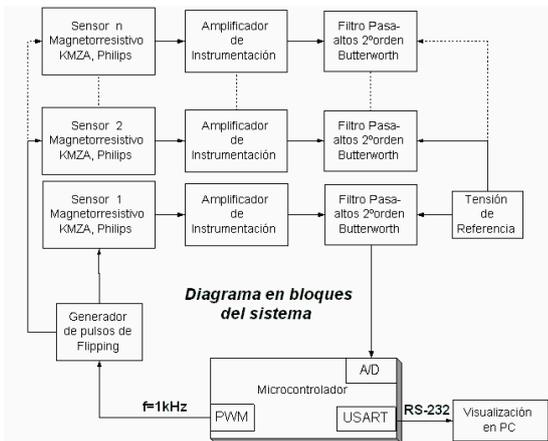


Fig. 7 - Diagrama en bloques del sistema a implementar.

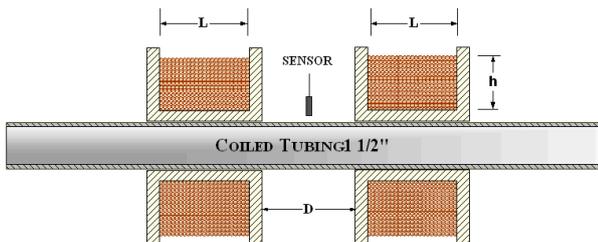


Fig. 8 – Geometría del modelo a resolver con FEM.

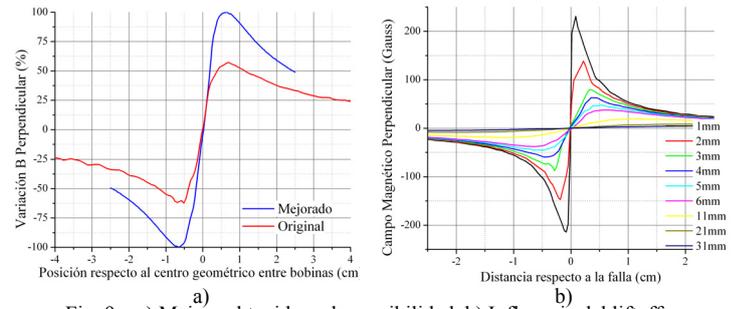


Fig. 9 – a) Mejora obtenida en la sensibilidad, b) Influencia del liftoff.

TABLA 1

PARÁMETROS INICIALES PARA LA SIMULACIÓN.	
PARÁMETRO	DIMENSIÓN
Ancho de la bobina (L)	13,5 cm
Altura de la bobina (h)	1 cm
Radio interno de la bobina (r_i)	3 cm
Separación entre bobinas (D)	20 cm
Longitud de la cañería	2 m
Distancia sensor-caño (Liftoff)	6 mm
Cantidad de vueltas (N)	540

TABLA 2

PARÁMETROS ÓPTIMOS OBTENIDOS.	
PARÁMETRO ÓPTIMO	DIMENSIÓN
Ancho de la bobina (L)	3,6 cm
Altura de la bobina (h)	3,6 cm
Separación entre bobinas (D)	2 cm
Radio interno de la bobina (r_i)	5 cm

La geometría del modelo utilizado se ilustra en la Fig 8, donde L es la longitud de las bobinas, h es la diferencia entre los radios interior y exterior, y D es la distancia entre ellas. Los valores iniciales de estos parámetros, entre otros, se detallan en la Tabla 1. Estos corresponden a las dimensiones del modelo experimental mencionado (excepto la distancia sensor-caño).

Para estudiar la sensibilidad se modeló una grieta transversal en la pared de la tubería de la Fig. 8. El procedimiento consistió en obtener y evaluar las componentes tangencial y perpendicular del campo sobre la superficie del caño para diferentes geometrías hasta obtener el máximo escape de campo, el cual determina las dimensiones óptimas.

Para poder comparar las distintas variantes era necesario que alguna de las variables en juego sea constante. Con este propósito, la cantidad de vueltas N (que define la sección) y el radio interno r_i de la bobina se mantuvieron fijos. También se mantuvo constante la corriente eléctrica i que circula por los arrollamientos, y por ende el campo magnético H aplicado.

A. Resultados obtenidos con la simulación

Los valores óptimos para L , D y h se presentan en la Tabla 2. Este modelo óptimo mejora la sensibilidad del sistema en un 85%, lo que se ilustra en la Fig. 9a, donde se compara la variación de campo debida a la grieta modelada tanto para el sistema original como para el optimizado.

Conjuntamente, se determinó que la distancia entre el sensor y la superficie del material a inspeccionar (denominada "liftoff") tiene significativa influencia en la capacidad de detección del sistema. Se encontró que a medida que el dispositivo de medición se aleja del material, la amplitud pico a pico de las señales medidas cae abruptamente, sumado a que éstas van perdiendo su forma pronunciada (Fig. 9b).

V. EXPERIENCIAS FINALES Y RESULTADOS

Una vez que se hallaron las dimensiones óptimas del sistema de magnetización se procedió a construir el sistema completo.

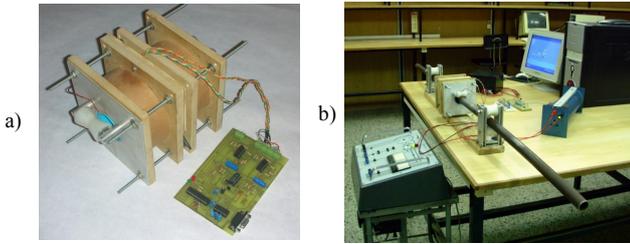


Fig. 10 – a) Prototipo terminado, b) Prototipo final en laboratorio.

El prototipo terminado se puede observar en la Fig. 10a. Para poder explorar toda la circunferencia de la tubería se necesitarían unos 24 sensores colocados en forma adyacente alrededor de la misma, con sus ejes de medición normales a la superficie. Sin embargo, se implementó la placa de adquisición para solo dos sensores, pues para los fines de evaluar la capacidad de detección del sistema es suficiente con examinar solo una porción del perímetro de la tubería. Por ésto, se utilizó el microcontrolador PIC16F873A [12] que tiene 5 canales para el conversor A/D y satisface holgadamente los requerimientos del sistema. En caso de implementarse el sistema completo sería necesario un procesador de alta velocidad, además de un conversor A/D de más canales. El resto de los circuitos son repetibles para cada sensor.

Para evaluar la performance del prototipo construido se realizaron experimentos similares a los descritos en la sección III. El sistema empleado en el laboratorio puede observarse en la Fig. 10b. Los ensayos consistieron en la medición del campo magnético normal a la superficie de otro tramo de CT de 1 ¼” y 2m de largo, con los dos sensores ubicados en el centro entre bobinas y a una distancia de aproximadamente 3mm de la superficie del caño (distancia prudente para proteger los sensores en caso de vibraciones o movimientos bruscos). Mediante una fuente de alimentación DC se alimentó a las bobinas con una corriente de 4,5A, que produce una magnetización cercana a la saturación del tubo.

B. Resultados

En las Fig. 11, 12 y 13 se exhiben solo algunas de las señales obtenidas en la medición de campo magnético en cercanías de los distintos tipos de imperfecciones, tanto artificiales como naturales, existentes en la muestra de CT. Se debe notar que las señales obtenidas con cada sensor tienen un valor medio diferente. Ésto se debe a que es realmente difícil regular perfectamente la posición de los mismos respecto a tubería.

De todas las experiencias realizadas se puede concluir que la amplitud y la forma de las señales medidas dependen directamente de la geometría de la discontinuidad y de la posición del sensor respecto de la misma. Cuanto más irregular sea la imperfección así lo será la señal asociada.

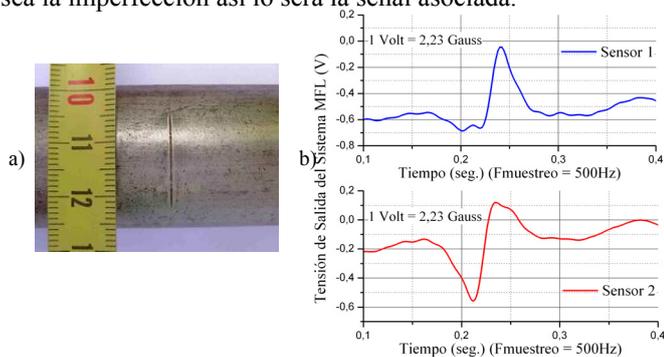


Fig. 11 - Entalla (17mm x 0,4mm x 0,15mm). a) Fotografía, b) señal obtenida.

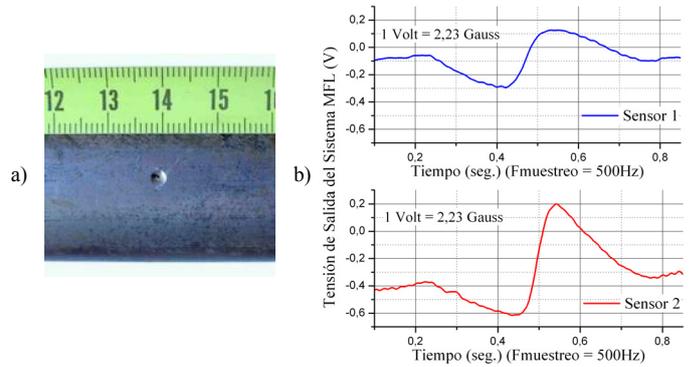


Fig. 12 – Pitting 1 ($\varnothing=2,7\text{mm}$ y 0,6mm de profundidad). a) Fotografía, b) señal obtenida.

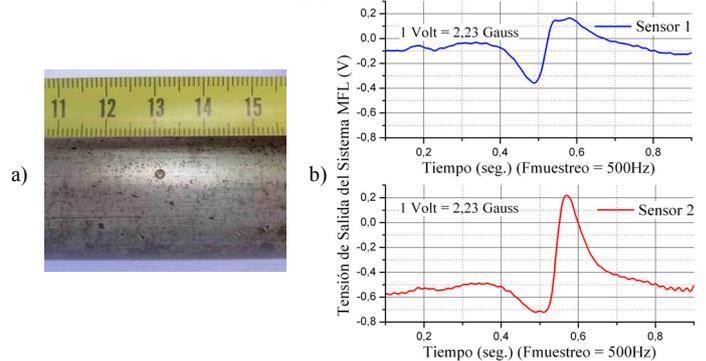


Fig. 13 - Pitting 3 ($\varnothing=2\text{mm}$ y 1mm de profundidad). a) Fotografía, b) señal obtenida

Se realizaron múltiples pruebas en las cuáles se inspeccionó la totalidad de los 2m de tubería. En la Fig. 14a se exhiben las señales de ambos sensores para uno de estos ensayos. Se puede identificar dentro de esta señal cada una de las señales generadas por las discontinuidades estudiadas. Aquellas que más claramente se identifican son, por supuesto, las de mayor tamaño, es decir, los pittings 1 y 3, y la entalla transversal.

Puede observarse también que existe un gran nivel de ruido incorporado. Estas señales espurias dificultan de forma considerable la identificación de defectos e incluso puede imposibilitarla. Éstas se originan cuando el sistema MFL detecta pequeñas fugas de campo que no se deben directamente a defectos o discontinuidades de interés [9], sino a:

- Variación natural de las propiedades magnéticas (componentes de la aleación, proceso de fabricación).
- Cambios en el espesor de la pared de la cañería.
- Variación del lift-off (distancia sensor-caño), causada por las condiciones de la superficie y/o vibraciones.
- La señal de corrientes parásitas generada por el desplazamiento del campo magnético aplicado sobre la superficie conductora.

Por último, debemos mencionar que todas las experiencias realizadas se efectuaron con un mismo tipo de cañería, por lo que sería interesante llevar a cabo una mayor cantidad de ensayos con otras muestras, otros tipos de fallas, quizás acompañadas de estudios de metalografía o alguna otra técnica, para poder realizar comparaciones entre resultados.

B. Propuestas de Mejora y Trabajos a Futuro

En primer lugar, queda pendiente la implementación de algún sistema que permita medir la velocidad con que se desplaza el tubo y de esta manera poder estimar con precisión la posición de las discontinuidades en el tubo inspeccionado.

El sistema en movimiento trae aparejado la existencia de vibraciones mecánicas y desplazamientos que conllevan a variaciones de la posición del sensor respecto a la tubería. Estas perturbaciones pueden afectar gravemente las mediciones hasta incluso hacer inservible el sistema. Aunque pueden reducirse sus efectos mediante filtrado u otros métodos, es de vital importancia que el sistema mecánico asociado sea considerado en detalle en el diseño de un prototipo definitivo.

Un sistema MFL eficiente debe ser capaz de diferenciar las señales de interés de aquellas provenientes de las perturbaciones, generalmente aleatorias. Este problema se agrava si consideramos también que la forma de las señales que nos interesan puede ser tan irregular como lo sea la discontinuidad que las genera.

Para ésto, es necesario entonces un estudio exhaustivo de las señales provenientes de distintos tipos de discontinuidades para poder obtener una mejor caracterización de las mismas, lo que permitiría una identificación más clara de defectos mediante patrones estadísticos y la implementación de algoritmos de reconocimiento de señales. Para ello existe la necesidad de establecer criterios de aceptación o rechazo de piezas, según la severidad de los defectos encontrados y su potencial incidencia en el rendimiento de las mismas en servicio.

A modo de ejemplo de un algoritmo de post-procesamiento, en la Fig. 14b y 14c se puede apreciar el resultado de calcular la derivada de las señales de la Fig. 14a. Cabe aclarar en este punto que las señales a las que se aplicó la derivada fueron filtradas previamente para eliminar los ruidos de alta frecuencia, como por ejemplo el ruido de cuantización del conversor A/D. Claramente se diferencian las indicaciones provenientes de los pits 1 y 3, además de la entalla; el resto de las discontinuidades no son observables. De ésto se puede extrapolar que no todas las discontinuidades pueden ser detectadas mediante el mismo procesamiento.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó e implementó un prototipo a escala de laboratorio basado en la técnica MFL para la detección de fallas en Coiled Tubing. Los objetivos y metas propuestos fueron alcanzados satisfactoriamente, dado que el sistema

implementado logró detectar gran parte de las discontinuidades estudiadas. En particular, se detectaron los pits 1 y 3, y la entalla con una relación señal a ruido promedio de aproximadamente 3 a 1, considerando el post-procesamiento propuesto en las Fig. 14b y 14c.

El modelo construido puede mejorarse en muchos aspectos, tales como el sistema mecánico, la utilización de circuitos electrónicos de precisión y sensores de mayores prestaciones; el post-filtrado y adaptación de las señales. Todos estos factores contribuirían a la detección de discontinuidades de menores dimensiones con mayor resolución. Es factible entonces la construcción de una herramienta de campo eficaz y de bajo costo para la inspección en línea de este tipo de tuberías.

REFERENCIAS

- [1] A. C. Afghoul, S. Amaravadi, A. Boumali, "Coiled Tubing: The Next Generation", Schlumberger 2004.
- [2] "An Introduction to Coiled Tubing, History, Applications and Benefits", International Coiled Tubing Assosiation (ICoTA), 2004, <http://www.icota.com>.
- [3] L. Smith and J. Misselbrook, "An Overview of Inspection Technology and Criteria for Inspecting Coiled Tubing" BJ Services, SPE 38413, 1997, <http://www.icota.com>.
- [4] ASM Handbook "Nondestructive evaluation and quality control", vol. 17, 2ª Ed., 1992, pág. 164 - 182.
- [5] S. Papadimitriou and R. K. Stanley, "The inspection of used Coiled Tubing", Second International Conference on Coiled Tubing operations, Marzo 1994.
- [6] R. K. Stanley, "An Overview of the Nondestructive Inspection Techniques for Coiled Tubing and Pipe", ASNT, 2004.
- [7] J. P. Carabajal, "Detección de fisuras por la técnica de flujo magnético disperso", Tesis de Maestría en Ciencias Físicas, Instituto Balseiro, Dic. 2004.
- [8] J. B. Nestleroth, T. A. Bubenik, "Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology for Natural Gas Pipeline Inspection", Battelle, Feb. 1999.
- [9] R. K. Stanley, "Observations on Magnetic Wall Measurements of Coiled Oilfield Tubing", Materials Evaluation, ASNT, Feb. 2004, pág. 125 - 128.
- [10] "Sensor KMZ10A datasheet", Phillips.
- [11] "General: Magnetic Field Sensors", Phillips.
- [12] Microcontrolador Microchip PIC16F873A datasheet.

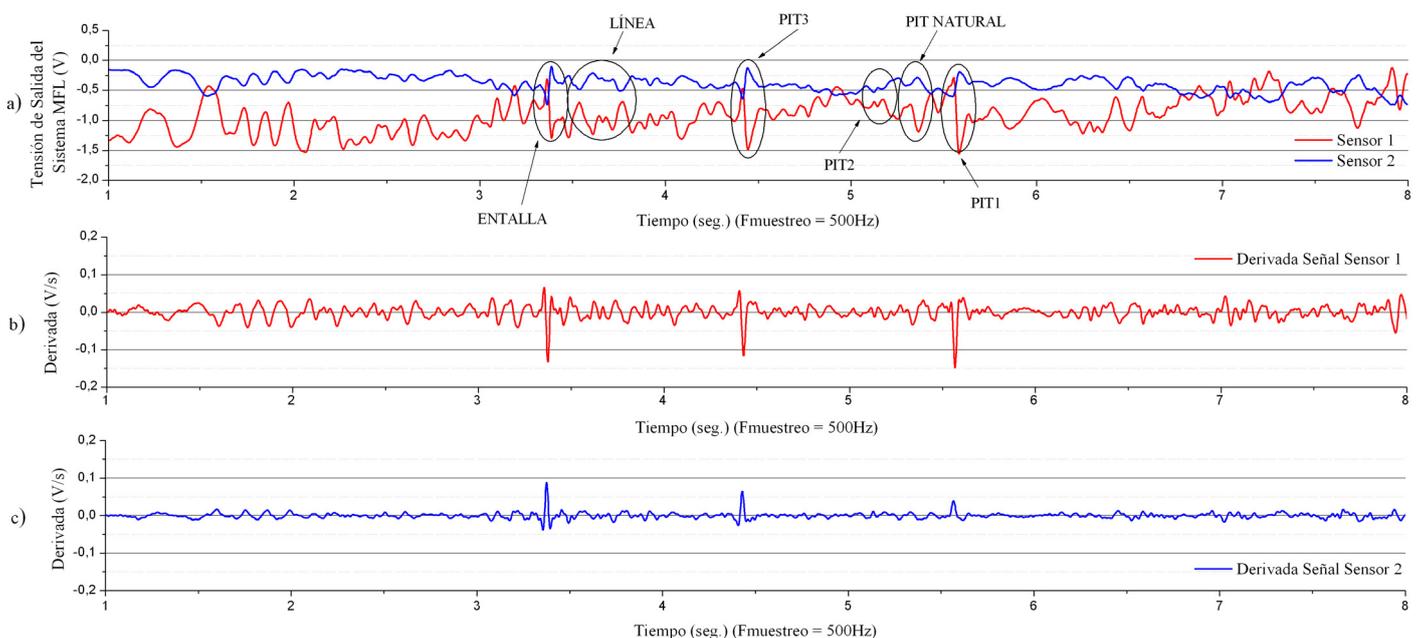


Fig. 14 - Señal de inspección de toda la tubería. (a) Señal para ambos sensores, (b) derivada de la señal del sensor 1, (c) derivada de la señal del sensor 2.