

INSTRUMENTO PARA EL MONITOREO DE LA CORROSIÓN INTERNA DE CAÑERÍAS EN EL SECTOR DE OIL & GAS IMECv1

Vico* Ángel; angel.vico@ypftecnologia.com

Morris* Walter; walter.morris@ypftecnologia.com

Yonamine+ Pablo Damián: pyonamine86@gmail.com

*YPF Tecnología + ARSULTRA S.A.

Palabras claves: Campo magnético (CM), Corrosión, Desarrollo, Electrónica, Espesores, Estructural, Hardware, Instrumento, Medición, Magnetic Flux Leakage (MFL), Prototype, SCADA, Sensor, Software, Tubos.

Resumen: Las fallas por corrosión en cañerías de conducción de fluidos de producción tienen consecuencias severas en la industria del petróleo y el gas. Si bien existen diversos dispositivos para monitorear la corrosión interna de estas instalaciones, dichos sistemas requieren el acondicionamiento previo para la instalación de cupones, celdas y/o probetas a partir de las cuales se realizan las mediciones indirectas de corrosión.

Este trabajo presenta el desarrollo de un nuevo sensor basado en la técnica MFL para monitoreo de la corrosión interna de cañerías. El dispositivo se monta sin alterar la instalación ni interrumpir la producción y tiene la capacidad de monitorear en forma continua y efectiva la variación de espesor utilizando un arreglo de sensores perimetrales. Permite evaluar en tiempo real la integridad de la tubería y almacenar los datos o transmitir la información mediante un sistema SCADA.

La etapa de desarrollo contempló una fase de simulación numérica para verificar el funcionamiento y la aplicabilidad de la técnica MFL y el dimensionado preliminar de los emisores/receptores de flujo electromagnético, la fabricación de los distintos componentes del prototipo (electrónica, sensores, bobinas generadoras de CM, etc.), y la validación experimental utilizando probetas tubulares con defectos de geometrías conocidas. Se realizó un banco de ensayos de laboratorio a escala real sobre una cañería de 4.5" conteniendo una solución salina y un sistema de polarización anódica para acelerar el proceso de corrosión interna. Se efectuaron mediciones durante un período de 54 días contrastando las mediciones con lecturas periódicas realizadas con ultrasonido.

Los estudios experimentales permitieron validar técnicamente el dispositivo. La premisa del desarrollo se focalizó en un equipo de bajo coste para viabilizar su posterior masificación.

La etapa que lo acontece tendrá por objetivo el acondicionamiento del equipo para montaje en campo de manera de evaluar su desempeño en condiciones reales de servicio mediante monitoreo remoto.

La sinergia lograda entre los grupos multidisciplinarios de trabajo de las dos instituciones permitió concretar este desarrollo en un período acotado de tiempo (1 año). Se espera avanzar en las fases siguientes del desarrollo para lograr un producto tecnológico local que contribuya a mitigar los problemas de corrosión en cañerías.

1. Introducción

Una de las preocupaciones más frecuentes en la industria del Oil & Gas es el problema de la corrosión, proceso que afecta a la mayoría de los componentes metálicos, comprometiendo con el tiempo la integridad de todo el sistema de producción. Por este motivo es de gran interés monitorear dicha corrosión para tomar acciones preventivas que eviten posibles fallas y sus consecuencias.

Este trabajo presenta el desarrollo de un instrumento prototipo, de bajo coste, para el monitoreo de la corrosión interna y sectorizada de cañerías de conducción, basado en la técnica conocida como Magnetic Flux Leakage (MFL) o pérdida de flujo magnético en el material, producto de una reducción en el espesor. Esta técnica consiste en magnetizar el material a inspeccionar, mediante el uso de imanes permanentes o bobinas electromagnéticas, hasta el punto de saturación magnética. En las reducciones del espesor se incrementa la densidad de FM, al estar el material cerca de la saturación magnética parte del flujo magnético escapa del espesor de la cañería y es detectada por los sensores de CM. Esto permite determinar el espesor remanente de una manera indirecta ya que la densidad de FM estará relacionada con la magnitud de la reducción en el espesor.

En la figura 1 se presenta en forma esquemática el funcionamiento de la técnica MFL

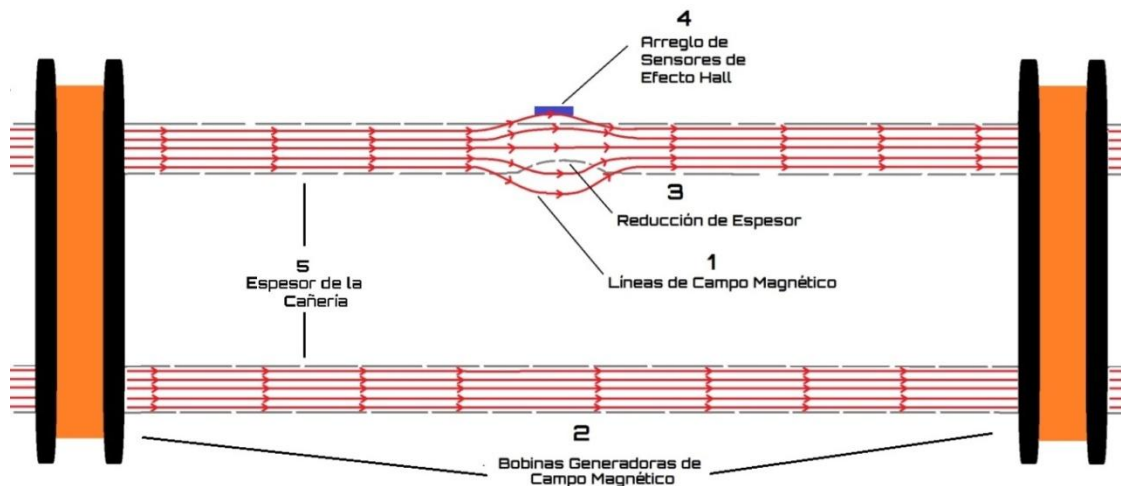


Figura 1. Esquema de funcionamiento del sensor de corrosión por MFL

La técnica de medición propuesta permite verificar de manera no destructiva y continua la integridad de la cañería desde su perímetro exterior. El dispositivo almacena la información en una memoria interna y envía los datos mediante un sistema SCADA para poder ser analizados remotamente por un operador. El desarrollo del instrumento prototipo fue el resultado de un trabajo en conjunto entre Y-TEC y ARSULTRA.SA.

2. Desarrollo

El proyecto se desarrolló en las etapas siguientes:

- Especificación de requerimientos técnicos.
- Simulación numérica por Elementos Finitos
- Diseño del Prototipo de Laboratorio.
- Manufactura del prototipo de Laboratorio.
- Ensayo de Verificación y Validación del instrumento prototipo en Laboratorio.

I. Especificación de requerimientos técnicos

La especificación de los requerimientos técnicos ha sido elaborada y fijada de común acuerdo entre YPF Tecnología y ArsUltra.

II. Simulación numérica

En la etapa inicial del proyecto se trabajó en forma intensiva en simulaciones numéricas que permitieron verificar el funcionamiento de la técnica MFL y evaluar su viabilidad para esta aplicación.

Mediante la simulación se pudieron probar diferentes configuraciones, variando los parámetros de las bobinas (número de espiras, diámetro del alambre, tensión de alimentación, etc.) y la geometría de las reducciones de espesores en la pared de la cañería, con el objetivo de tener una señal que pueda ser detectada con los sensores magnéticos. En la figura 2 se esquematiza la geometría del problema a simular.

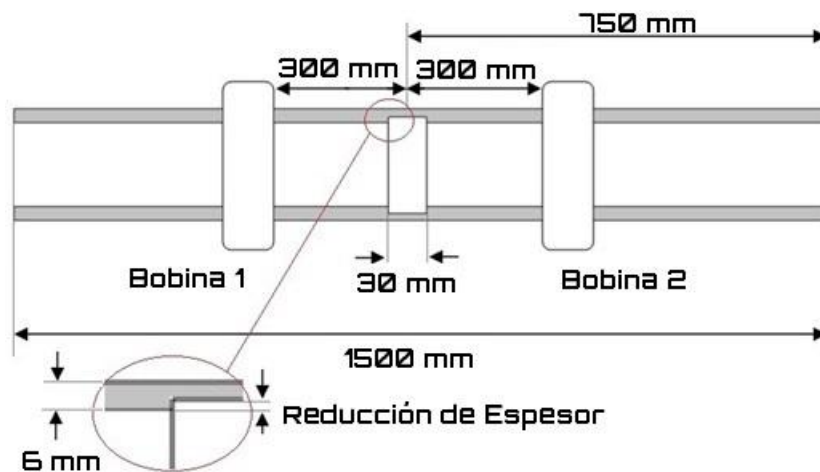


Figura 2. Geometría del problema a simular

Simulación 3D. El objetivo principal de esta simulación es observar el comportamiento del CM en el espesor del tubo en presencia de una reducción en el espesor.

Se magnetizó el material de una cañería API5L de 1.5m de longitud, mediante dos bobinas generadoras de CM conectadas en serie. Las bobinas se encuentran direccionadas sobre la cañería de manera que el CM generado, en el centro de las bobinas, tenga la misma dirección.

Se realizaron simulaciones con diferentes tipos de defectos:

- a) Reducción de espesor localizado en la parte interior superior de la cañería (Figura 3.a).

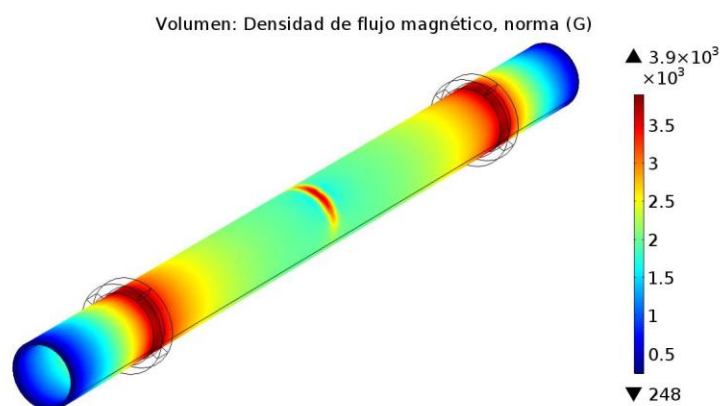


Figura 3.a. Densidad de FM cañería API5L, reducción de espesor localizada

- b) Reducción de espesor interior en forma radial (Figura 3.b).

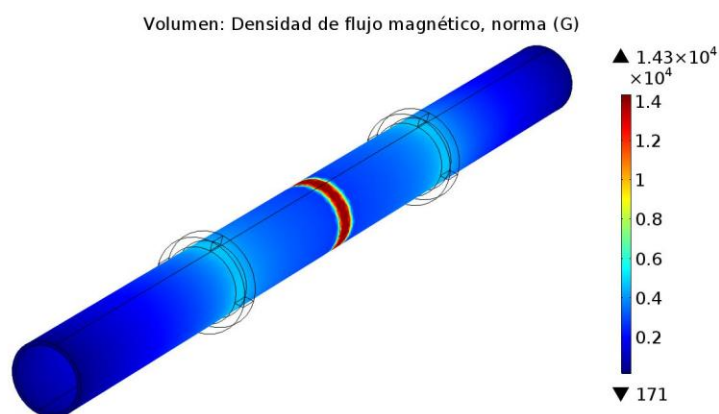


Figura 3.b. Densidad de FM cañería API5L, reducción de espesor radial

En las figuras 3 a y b se observa el aumento de la densidad de FM en la zona donde se encuentra ubicada la reducción en el espesor. Esto es debido a la concentración de líneas de CM en presencia de una reducción en el espesor. Ésta concentración de líneas CM provoca que parte de las mismas escapen del material y se conduzcan por el aire.

Simulación 2D axisimétrico. Gracias a que el problema presenta una simetría axial se pudo utilizar un módulo de simulación axisimétrico el cual permite simplificar los cálculos y reducir el tiempo de simulación sin alterar los resultados. Este método realiza los cálculos de una porción de la geometría y luego por simetría representa el resultado para toda la pieza (Figura 4).

Las simulaciones permitieron poner de manifiesto la densidad de FM que escapa del espesor de la cañería debido a la reducción en el espesor y encontrar una relación entre el valor de densidad de FM y la reducción en el espesor.

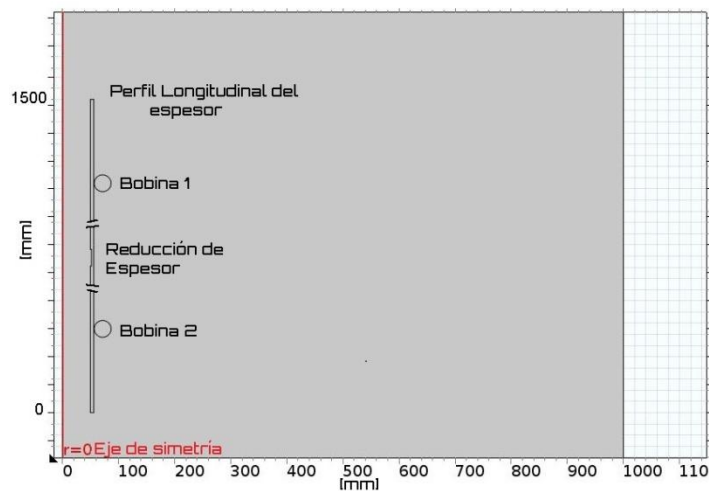


Figura 4. Perfil de la Geometría axial (Modelo de simulación)

Se simularon distintos valores de reducciones de espesor entre 0.1 y 5 mm. Se evaluó la densidad de FM que escapa al aire en la zona del defecto. Se analizó particularmente la componente longitudinal de dicha densidad de FM, es decir, la componente en dirección paralela al eje longitudinal de la cañería.

La medición se llevó a cabo sobre una línea paralela al tubo, como muestra la figura 5, dicha línea posee una separación de 1 mm respecto a la superficie de la cañería.

En la tabla 1 se resumen los parámetros considerados en la simulación.

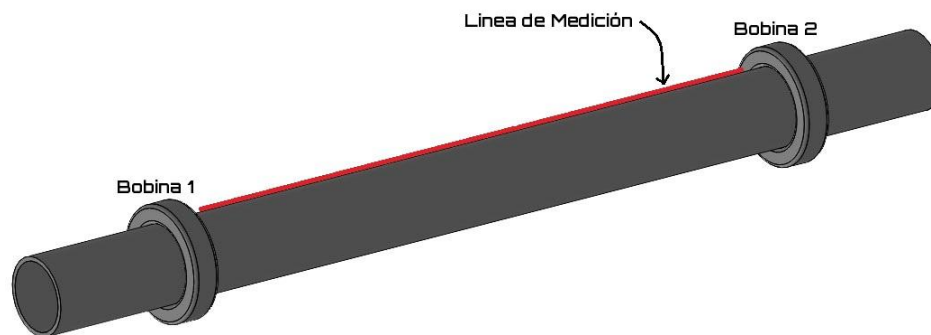


Figura 5. Modelo (Línea de medición)

Tabla 1. Parámetros de la simulación

Parámetros	Descripción	Valor	Unidad
b	Número de bobinas	2	[-]
d	Diámetro del alambre de la bobina	1	[mm]
N	Número de espiras de cada bobina	150	[-]
dis	Distancia entre bobinas	60	[cm]
V	Tensión de alimentación	20	[V]
A	Corriente	3	[Amp]
Dext	Diámetro externo de la cañería	114.3	[mm]
L	Largo de la cañería	1500	[mm]
e	Espesor de la pared	6	[mm]

Resultados de las simulaciones. En las figuras 6.a a 6.f se observan los resultados de las simulaciones sin reducción de espesor y con distintos valores de reducción de espesor que van de 1 mm a 5 mm.

La densidad de FM en el material de la cañería la podemos observar en escala de colores tipo Rainbow. A medida que aumenta la profundidad del defecto vemos como se incrementa la densidad de FM y la tonalidad del mismo se vuelve un rojo más oscuro.

En Líneas de Flujo podemos observar las líneas de CM que viajan por el aire. A medida que se incrementa la profundidad del defecto vemos como se deforman estas líneas debido al flujo de CM que escapa del material en la zona donde se encuentra el defecto.

En la figura 7 se muestra la variación de densidad de FM para distintos valores de reducción de espesor de cañería.

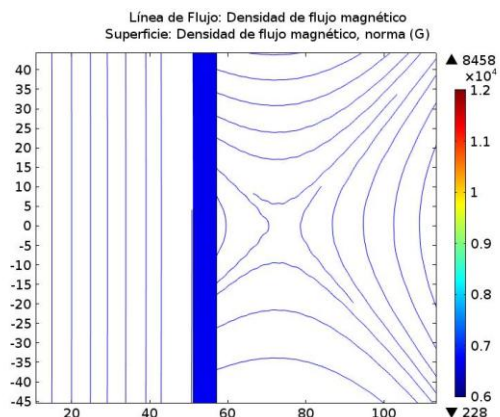


Figura 6.a – Sin reducción

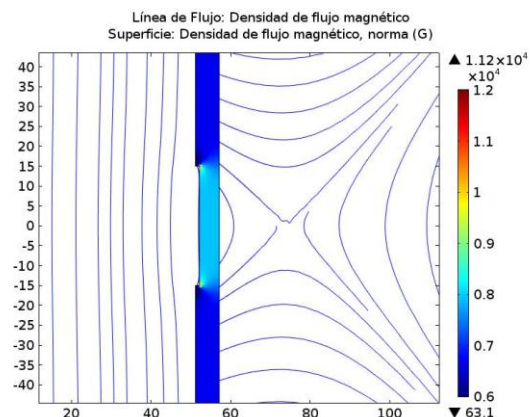


Figura 6.b – Reducción 1mm.

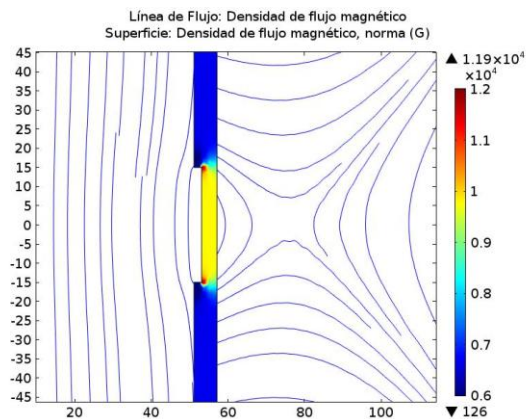


Figura 6.c – Reducción 2 mm.

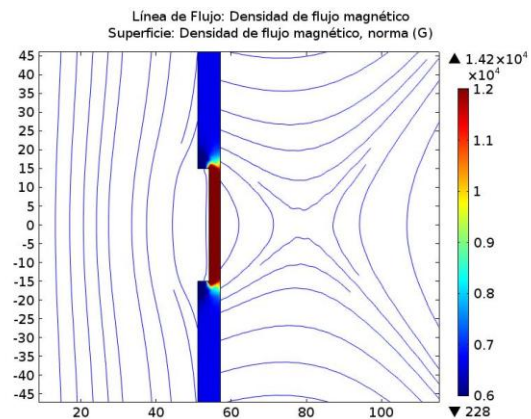


Figura 6.d – Reducción 3mm.

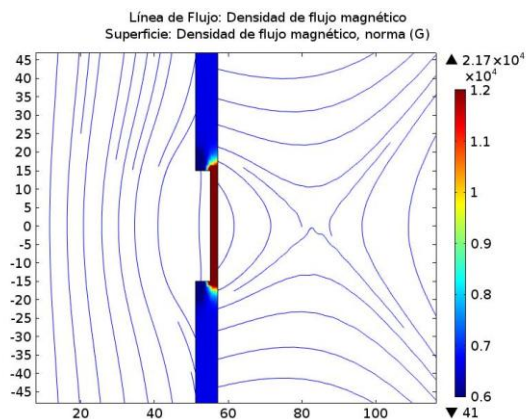


Figura 6.e – Reducción 4 mm.

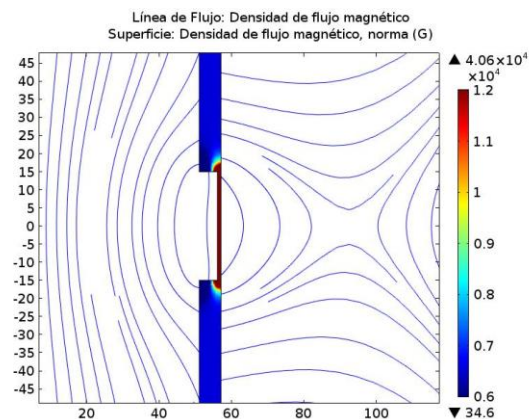


Figura 6.f – Reducción 5 mm.

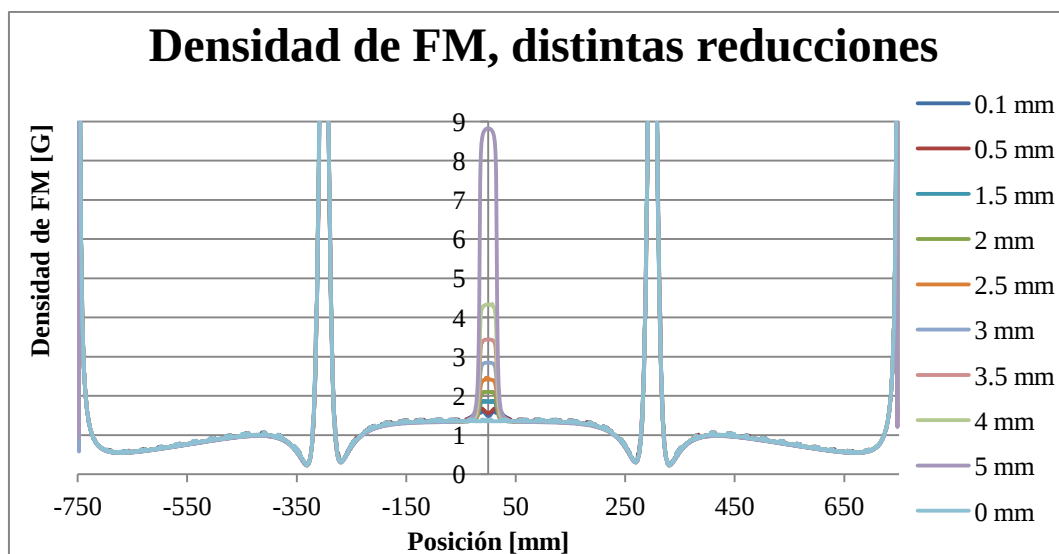


Figura 7. Variación de densidad de FM sobre línea de medición

En la figura 7 se observan los resultados de la variación de la densidad de FM sobre la línea de medición (Ver figura 5). Las bobinas se encuentran ubicadas en las posiciones ± 300 mm, es por esto que se observan ambos picos en dichas posiciones. La reducción de espesor se encuentra centrada respecto de las bobinas. Se observa un aumento de la densidad de FM a medida que la reducción de espesor se incrementa.

En la figura 8 se grafica la relación de la densidad de FM en función de la reducción de espesor de la cañería.

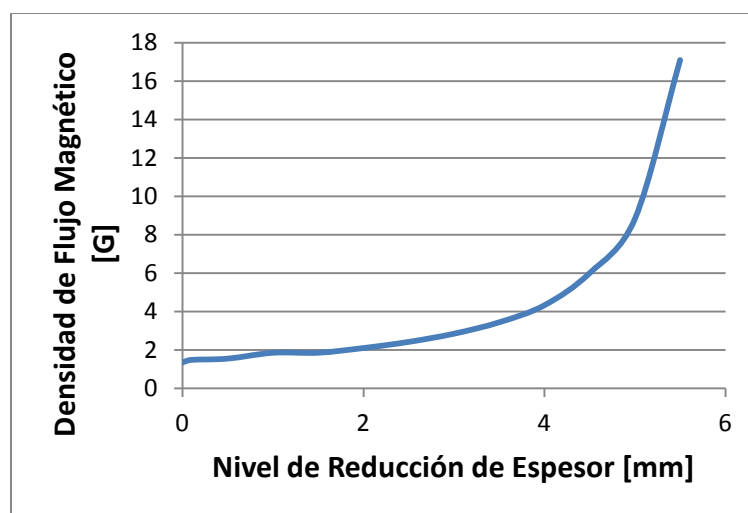


Figura 8. Relación densidad de FM vs Reducción de espesor

III. Diseño del Prototipo de Laboratorio

a) **Diseño del sensor.** El sensor del instrumento estuvo basado en los siguientes criterios de diseño:

- Diseñar un sensor que pueda medir y adquirir datos de espesores en tubos desde la parte perimetral exterior del mismo.
- Estar adaptado al perímetro externo de la cañería, lo cual debe tener una geometría flexible.
- El sensor debe ser capaz de tolerar las condiciones ambientales hostiles de la industria.
- Utilizar modelos de simulación numérica para calcular todos los aspectos electromagnéticos necesarios para ubicar los sensores, de manera que la electrónica del collar sensor tenga una medida adecuada.
- Se utilizaron modelos de CAD, para el diseño estructural de cada una de las partes del sensor. (Ver figura 9).

El dispositivo original cuenta con 8 sensores magnéticos dispuestos en forma radial sobre un collar flexible asociado a una electrónica que administra la adquisición de la medición. Los sensores magnéticos cuentan con una separación de 15 mm y abarcan una longitud total de 105mm.

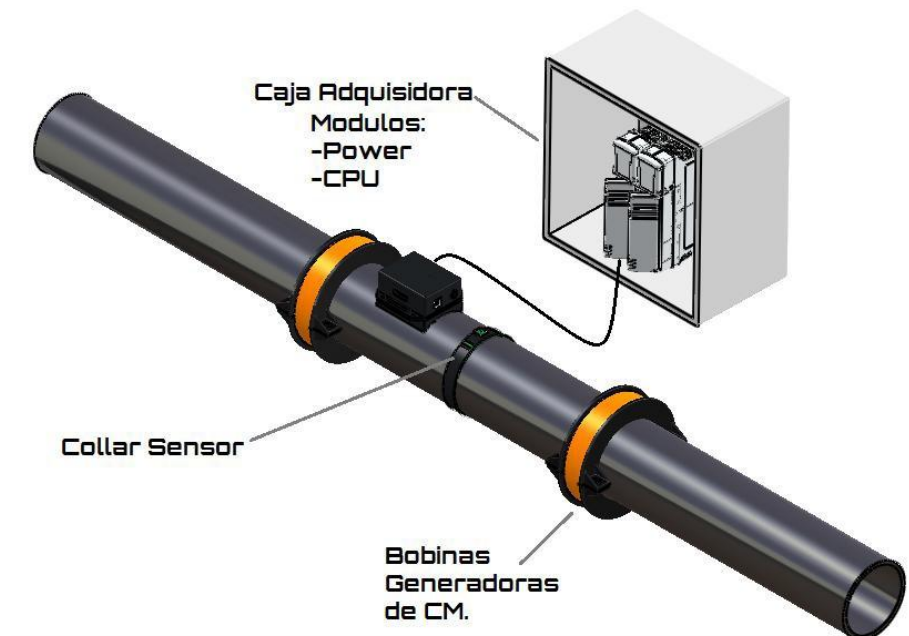


Figura 9. Instrumento Prototipo de Laboratorio para la medición de espesores en tubos.

- b) **Diseño de las bobinas.** Las bobinas generadoras de CM son las encargadas de magnetizar el material de la cañería hasta la saturación magnética. Las bobinas en esta etapa de prototipo de laboratorio fueron diseñadas utilizando un carrete en dos medias cañas que se ensamblan sobre la cañería y luego se procede a realizar el bobinado de la misma.

Las bobinas están conectadas en serie para que el CM generado por ambas tenga la misma intensidad y se encuentran orientadas sobre la cañería de manera que se sumen dichas intensidades de CM.

- c) **Diseño de Hardware del Instrumento – CPU.** En la figura 10 se muestra una imagen del PCB-CPU diseñado y construido para la fabricación del prototipo.

- CPU basada en un procesador ARM STM Cortex M4 de 32 bit.
- Diseño de la placa electrónica en 4 capas.
- Memoria RAM de 32 Mbytes de 166 MHz con SDRAM de 16 Bit.
- Alimentación de entrada de 5V DC e interna de 3.3V DC y 1.8 V DC.
- Comunicación ETH y USB.
- Interfaz Serie I2C / RS485.

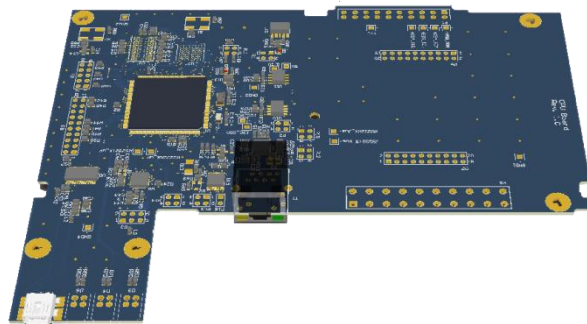


Figura 10. PCB CPU diseñado y fabricado para la construcción del prototipo.

d) **Diseño de Software**

- Diseño del Firmware de la placa CPU.
 - i. Gestiona la adquisición de los datos de los sensores.
 - ii. Almacena los datos en memoria interna flash.
 - iii. Envía los datos al SRV (Ethernet).
- Diseño de SW del SRV
 - i. Almacena los datos provenientes de los módulos adquirentes.

- ii. Contiene la interfaz de usuario para la interpretación de los datos de manera gráfica.

El instrumento posee un software de soporte para el usuario que permite interactuar con el mismo para realizar las adquisiciones de telemetría y visualizar de la misma. La aplicación WEB se encuentra alojada en un SRV y tiene la siguiente visualización (Figura 11).

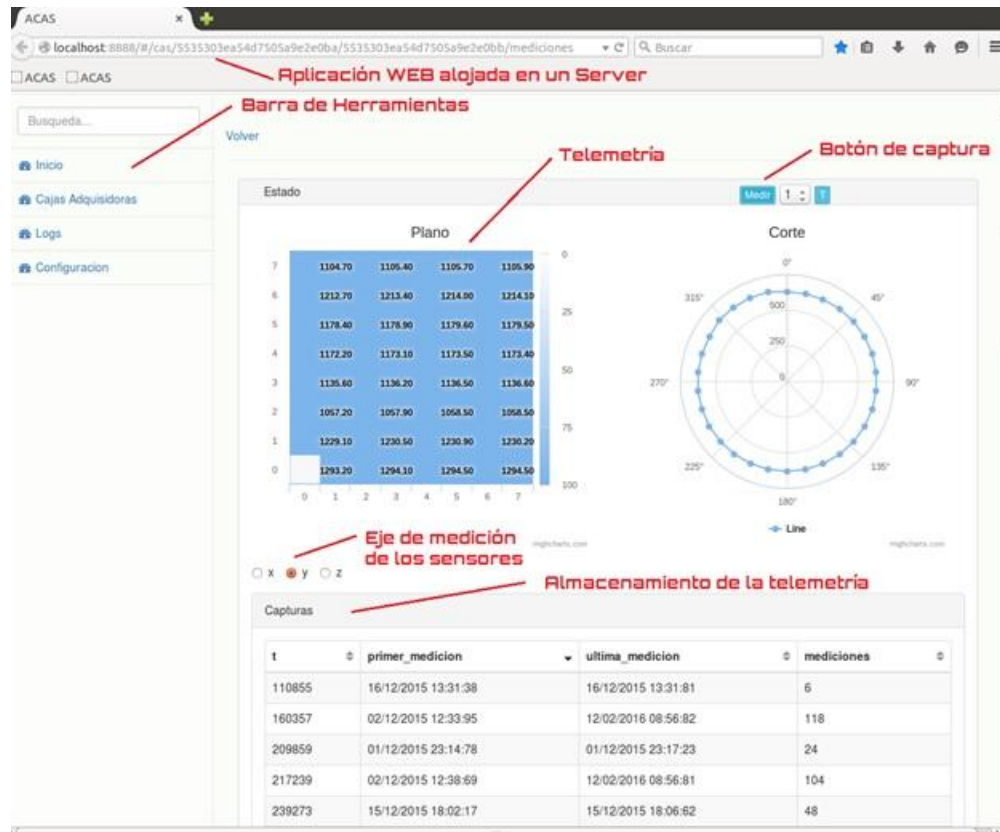


Figura 11. Interfaz de Usuario

El mismo cumple el objetivo básico de visualización de la telemetría de adquisición por parte de los sensores y dejar registro del mismo. El hecho de poder conectarse mediante un navegador WEB, le brinda al equipo flexibilidad a la hora de la instalación, ya que la base de datos o host se encuentra alojada en un servidor externo.

- IV. **Manufactura del Prototipo de Laboratorio.** En esta etapa se procedió a la fabricación de todos los componentes del instrumento prototipo basado en los diseños llevados a cabo en las diferentes áreas.

Dentro de las actividades de construcción del prototipo se realizaron actividades de mecanizado, manufactura de las placas de circuito impreso, poblado de las placas de electrónica con componentes, manufactura de un collar flexible con 8 sensores de CM y su harness asociado, y la elaboración de diferentes partes del instrumento. También se realizó la manufactura de tubos patrón para la calibración del mismo. En la figura 12 se muestra el setup del instrumento prototipo.

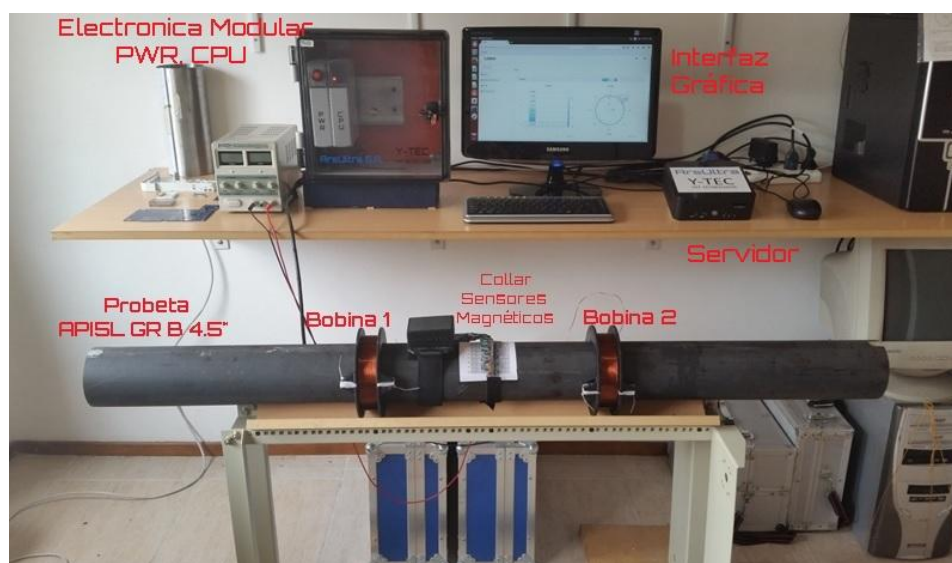


Figura 12 – Setup instrumento prototipo

- V. **Ensayo de Verificación y Validación del instrumento prototipo en Laboratorio.**

- **Ensayo de laboratorio con probeta calibrada.** Descripción y análisis del ensayo de laboratorio realizado en el banco de ensayos. El objetivo fue validar los resultados obtenidos en las simulaciones mediante la medición del espesor en una probeta calibrada. Dicha probeta fue realizada con una cañería API5L de material acero ASTM A53 GR B OD 4,5" y con un SCH40 (6mm de espesor de pared) a la cual se le confecciono reducciones de espesores en forma de canal con una profundidad de 1 mm y 2 mm respectivamente. En la figura 13 se presenta la probeta con entalla en forma de canal.

En las figuras 14 y 15 se grafican los resultados obtenidos en los ensayos de V & V para la reducción de espesor de 1 y 2 mm. Los resultados experimentales se corresponden con los obtenidos en las simulaciones. Al incrementar la reducción de espesor se incrementa la densidad de FM que escapa del material de la cañería en la zona donde se encuentra ubicada la reducción en el espesor.

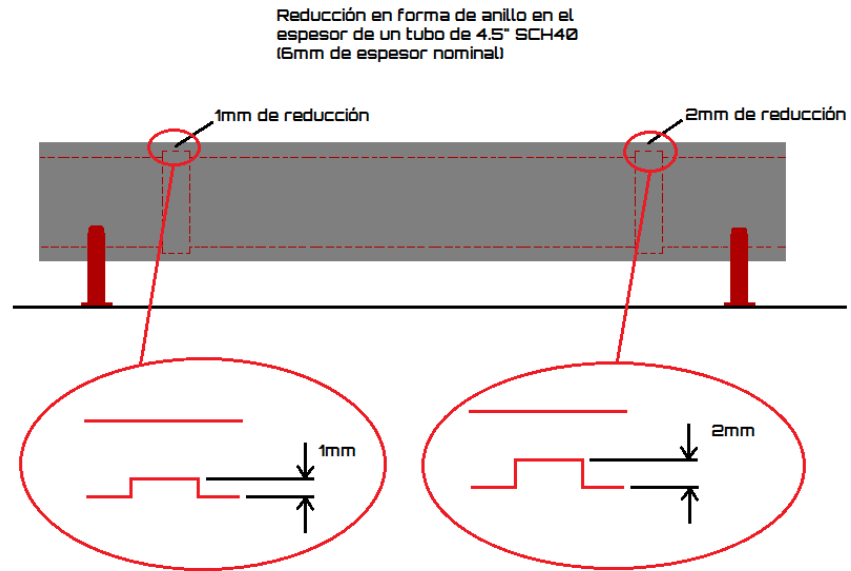


Figura 13. Probeta para ensayo V & V

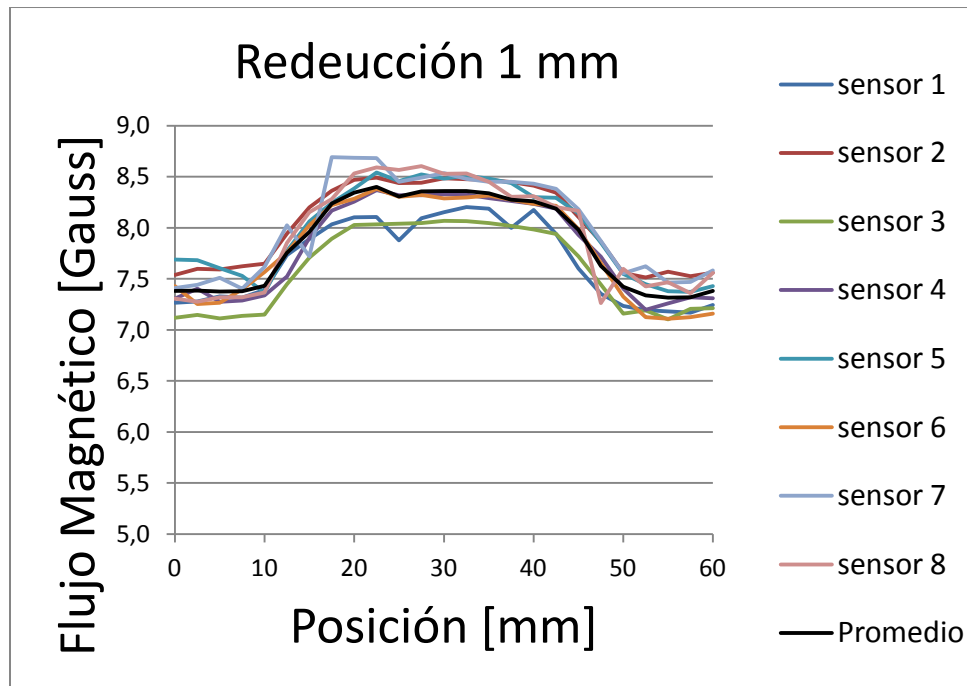


Figura 14. Resultado medido en probeta con 1 mm de reducción

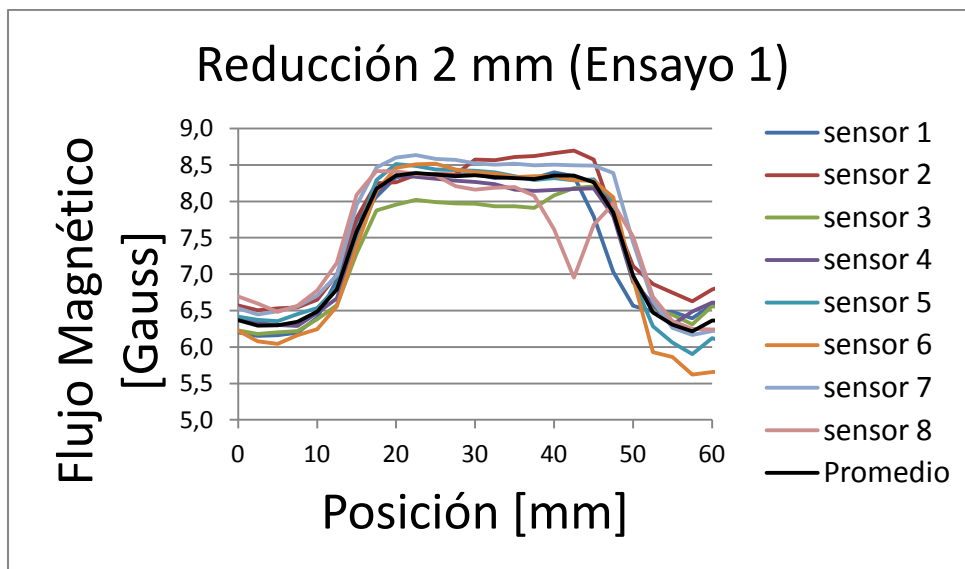


Figura 15. Resultado medido en probeta con 2 mm de reducción

- **Ensayo de laboratorio con proceso acelerado de corrosión.** La corrosión se produce por un proceso electroquímico, mediante una solución salina en el interior de la cañería y un sistema de polarización anódica que acelera la disminución de espesor. Se recubrió toda la probeta con un revestimiento epoxi dejado desprotegida una zona localizada del perímetro interior, en la que se midió la reducción del espesor. (Ver figura 16).

El ensayo tubo una duración aproximadamente 2 meses, de manera de evaluar el comportamiento y la estabilidad del dispositivo en condiciones controladas. Se registró en tiempo real la evolución del proceso de corrosión acelerado electroquímicamente observado por el instrumento.

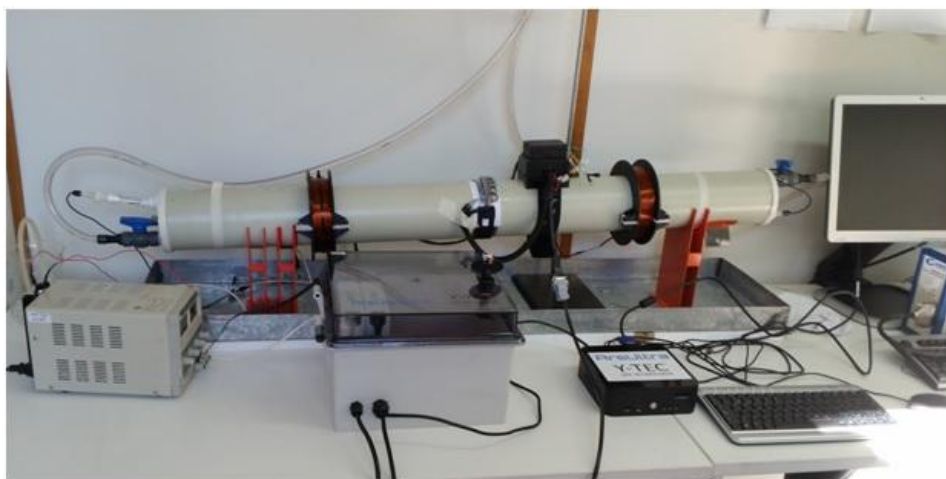


Figura 16. Setup de para ensayo acelerado de corrosión.

Se efectuaron 5 mediciones diarias las cuales fueron almacenadas en memoria para su procesamiento. Los registros fueron contrastados con mediciones de espesores de tomadas con un equipo de ultrasonido. En la figura 17 se presentan los valores de densidad de FM medidos con el instrumento.

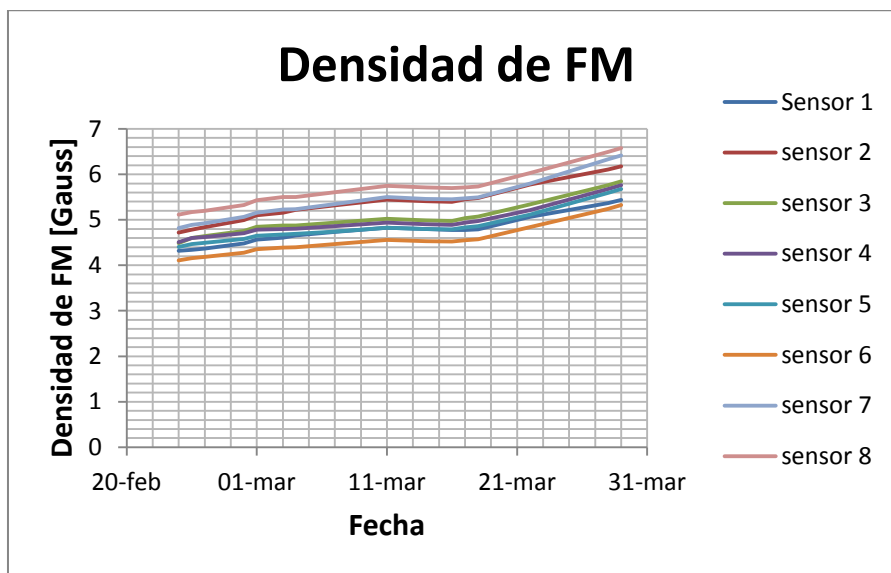


Figura 17. Valores de FM medidos ensayo de corrosión acelerado.

Mediante los resultados obtenidos en el ensayo sobre la probeta calibrada de 1 y 2 mm de reducción de espesor se realizó una curva lineal de calibración para realizar la conversión de densidad de FM a reducción de espesor. En la figura 18 se presentan los resultados luego de la conversión a reducción de espesor de cañería en mm.

Se observa una gran similitud en la medición que realizó el instrumento prototipo respecto a la medición realizada con ultrasonido. Existe un desvío en los extremos de la medición debido a que la curva de calibración para convertir la densidad de FM a reducción de espesor (mm) se aproximó con una recta y como pudimos ver en los resultados de las simulaciones esta relación no es lineal. Al finalizar el ensayo se realizó un relevamiento con el instrumento prototipo realizando una medición en forma de barrido longitudinal en la zona donde se encontraba el área desprotegida. En la figura 19 se presentan los resultados de este estudio.

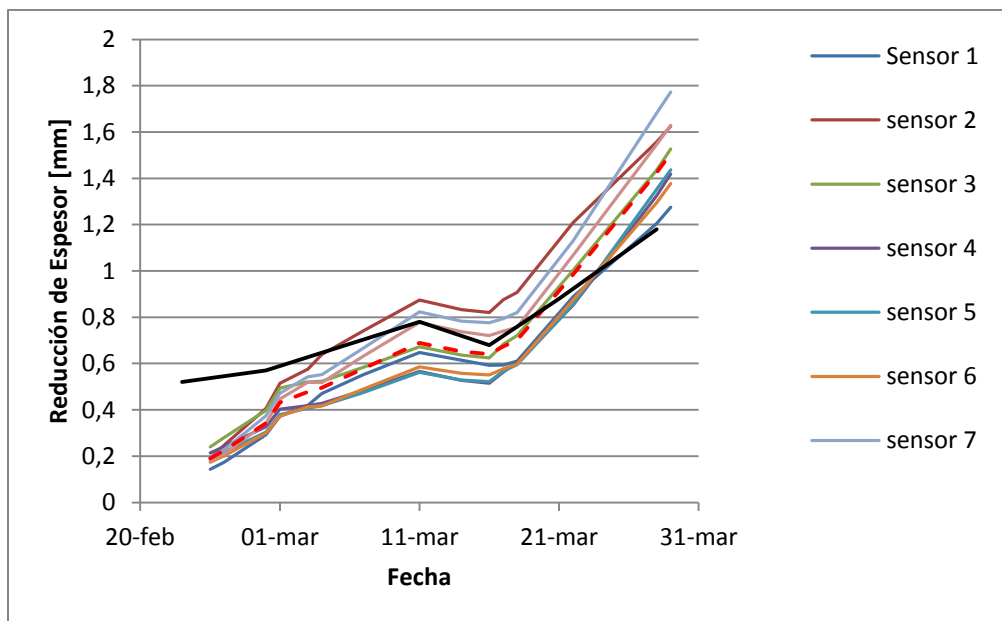


Figura 18. Resultados de reducción de espesor de cañería en mm

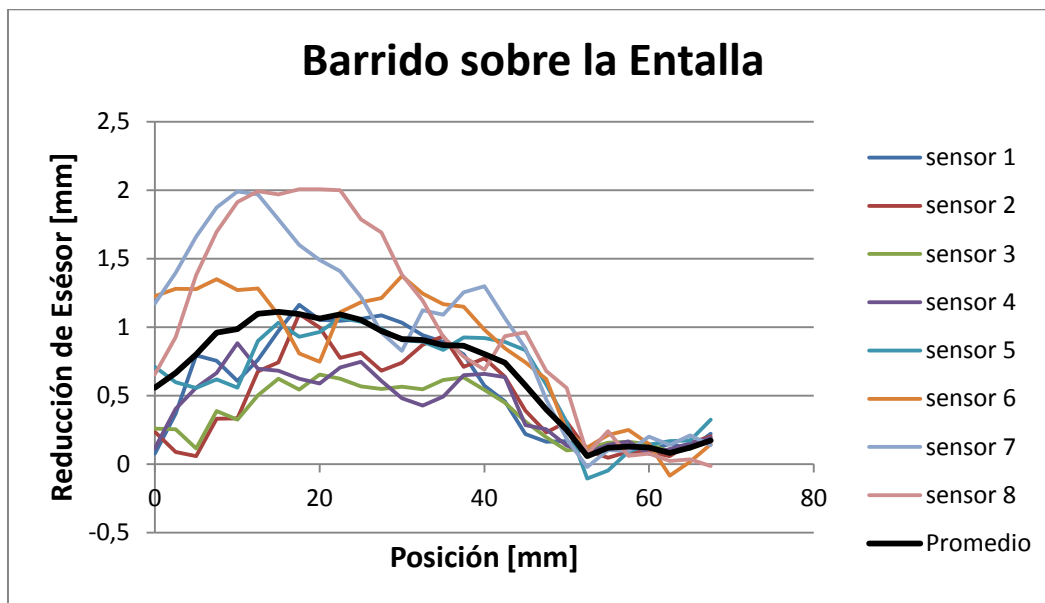


Figura 19. Resultados obtenidos del ensayo de barrido sobre cañería con corrosión acelerada

3. Conclusiones

Se desarrolló un dispositivo prototipo de bajo costo para medir en forma no-destructiva el avance de la corrosión interna en cañerías. El dispositivo se monta desde el exterior de la cañería sin necesidad de modificar la instalación ni interrumpir la producción. El equipo almacena las lecturas en una memoria interna y transmite la información por Ethernet hacia un servidor. La información es procesada para ser evaluada por un operador en forma remota.

El prototipo fue diseñado a partir de simulaciones numéricas y validado experimentalmente utilizando probetas tubulares con defectos de geometrías conocidas. Se realizó un banco de ensayos de laboratorio a escala real sobre una cañería de 4.5” conteniendo una solución salina y un sistema de polarización anódica para acelerar el proceso de corrosión interna. Se efectuaron mediciones durante un período de 54 días contrastando las mediciones con lecturas periódicas realizadas con ultrasonido.

La premisa del desarrollo se focalizó en un equipo de bajo coste para viabilizar su posterior masificación. La etapa siguiente del desarrollo tendrá por objetivo el acondicionamiento del equipo para montaje en campo de manera de evaluar su desempeño en condiciones reales de servicio mediante monitoreo remoto.

La sinergia lograda entre los grupos multidisciplinarios de trabajo de las dos instituciones permitió concretar este desarrollo en un período acotado de tiempo (1 año). Se espera avanzar en las fases siguientes del desarrollo para lograr un producto tecnológico local que contribuya a mitigar los problemas de corrosión en cañerías.

4. Bibliografía

Specification for Line Pipe, API SPECIFICATION 5L, 15TH Edition, December 2012

Lista de acrónimos

MFL: Magnetic Flux Leakage

FM: Flujo Magnético

CM: Campo Magnético

PCB: Printed Circuit Board

CPU: Central Processing Unit

V & V: Verificación y Validación

YPF-Publico

CV's Autores

Angel Vico

Ingeniero en Materiales, egresado de la Universidad Nacional de Mar del Plata (2000). Desarrolló varias actividades de investigación en el Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Materiales (INTEMAConicet) y a partir del 2003, en la gestión de integridad de activos en empresas como Pan American Energy, Apache e YPF. En 2014 ingresó a Y-TEC como tecnólogo en el área de Ingeniería de Materiales de la Gerencia de Upstream. Actualmente se desempeña como Ing. Corrosión del Activo ANC-YPF,

Walter Morris

Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). Master en Ciencia e Ingeniería de USF, EE.UU., y Doctor en Ciencia de los Materiales de UNMdP. Se desempeñó como investigador en el Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Materiales (INTEMAConicet) así como en el Departamento de Materiales de CAC-CNEA. Tiene más de 15 años de experiencia en la industria del petróleo y trabajó en el área de Tecnología de SAI como Product Champion de Desarrollo. Desde 2012 en Y-TEC como Product Champion de Materiales. Cuenta con más de 85 publicaciones científicas y presentaciones en congresos de Oil & Gas.