

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2019

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 16

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Desarrollo de un sistema de compensación del campo magnético terrestre para sensores magnéticos situados sobre objetos móviles: Aplicación a sensores de deformación mecánica en buques

Investigador/a/es responsable/es: Francisco Javier Carrizo Medina

Tfno: 2271

E-mail: carrizo@uniovi.es

Otros investigadores: Graciela Riesgo García

Empresas o instituciones colaboradoras: Centro de Seguridad Marítima Jovellanos, Sociedad de Clasificación Bureau Veritas Iberia S.L.U. (Marine Offshore Division), Sociedad de Clasificación Lloyds Register EMEA.

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El objeto del presente proyecto es la adecuación de un sensor magnético capaz de detectar las pequeñas deformaciones que pueden sufrir estructuras cuando sobre ellas actúan tensiones mecánicas. En concreto, nos centramos en el caso de estructuras móviles como los buques durante la navegación.

La figura 1 muestra un esquemáticamente el fundamento del sensor.

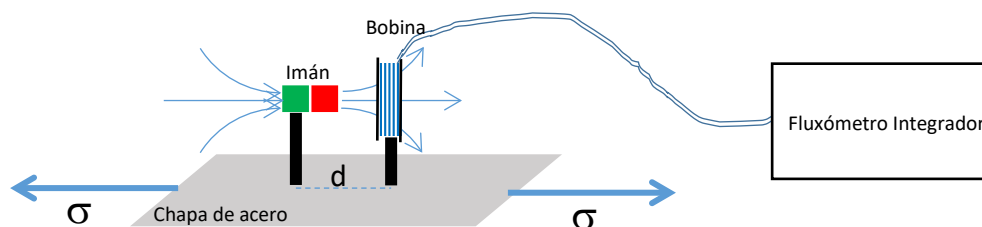


Figura 1. Esquema de funcionamiento del sensor

El sensor consta de un imán y una bobina coaxiales y situados solidariamente sobre la plancha del material que se pretende medir, que en este caso sería una chapa de acero naval. El campo magnético del imán produce un flujo en la bobina que se mide con un fluxómetro integrador. Cuando la chapa sufre un esfuerzo mecánico σ , la distancia d entre los soportes del imán y la bobina varía sufriendo la misma deformación de la chapa. Esta variación producirá un cambio en el flujo que será registrado por el fluxómetro.

Se precisa resolver dos problemas:

1. Construir un sensor capaz de detectar deformaciones del orden de 10^{-5} - 10^{-6} que son deformaciones entre 100 y 1000 veces más pequeñas respectivamente que las sufridas por la chapa de acero naval estándar en su límite elástico. Teniendo en cuenta que nuestro sensor podría tener una longitud (distancia d en la figura 1) del orden de 10 cm, esto quiere decir que nuestro objetivo es un sensor capaz de detectar cambios orden de décimas de micra en su longitud.
2. Eliminar el efecto del campo magnético terrestre. Para conseguir que el sensor tenga suficiente sensibilidad, el número de espiras de la bobina debe ser elevado (decenas de miles de espiras). Esto hace que el campo magnético terrestre, aunque es muy pequeño ya que es del orden de 5×10^{-5} T, produciría un flujo en la bobina del orden de 10^{-4} Wb. Si el sensor permaneciera estático, podríamos eliminar el flujo debido al campo magnético de la tierra fácilmente haciendo un "reset" en el fluxómetro; el problema está en que el sensor va a ir montado sobre un sustrato en movimiento que cambia su orientación continuamente con respecto al campo magnético de la tierra.

Para la comprobación del punto 1 optamos por fabricar bobinas y medir directamente en el fluxómetro cómo varía el flujo magnético al acercar o alejar distintos imanes.

Para eliminar la componente del campo magnético terrestre teníamos dos opciones: apantallamiento o compensación. Hemos optado por estudiar la compensación, ya que el apantallamiento siempre se puede agregar después.

La compensación se produce mediante el uso de dos bobinas en oposición, de forma que el campo magnético terrestre genera en una un flujo positivo y en la otra un flujo negativo. El problema para una compensación total estriba en que las bobinas deben ser idénticas y completamente coaxiales.

La mejor solución que hemos encontrado para conseguir una buena compensación del campo magnético terrestre se puede ver en la figura 2.

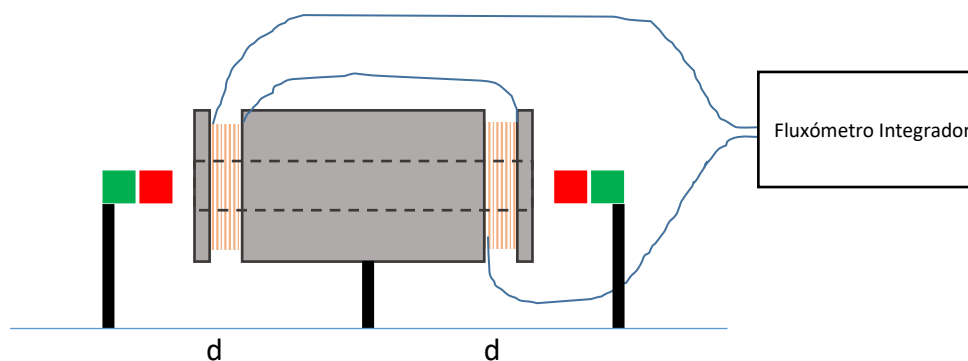


Figura 2. Esquema del sensor con bobina de compensación

Las características del sensor son las siguientes:

1. El cuerpo del carrito es común a las dos bobinas, está fabricado en PVC y por construcción las dos bobinas son coaxiales.

2. Se aprovecha la segunda bobina para aumentar la sensibilidad del sensor, ya que es usada también como un segundo sensor colocado en serie al primero.

Para realizar las medidas se diseñó y construyó una instalación sobre un eje de acero por el que pueden deslizar los imanes montados en un soporte de cojinetes lineales. Los imanes son empujados por tornillos micrométricos para controlar su posición. La figura 3 muestra una fotografía de esta instalación.

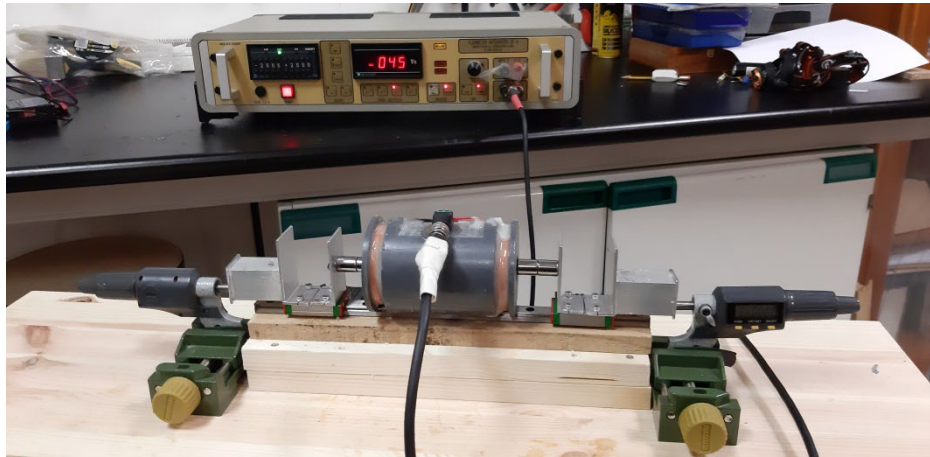


Figura 3. Instalación de medida

Las medidas consistieron en ir acercando ambos imanes por cada lado, registrando el aumento del flujo que se recoge en el fluxómetro. Se hicieron medidas con cuatro sensores distintos y usando distintos imanes con el fin de determinar las características del sensor que produzcan una mayor sensibilidad y también un buen apantallamiento del campo magnético terrestre.

Una vez vistos los resultados, para poder medir la variación del flujo con variaciones de posición del orden de micras, se construyó una segunda instalación en la que la posición del imán es controlada por un motor paso a paso de 200 pasos por vuelta con una reductora de 100:1. La figura 4 muestra esta instalación de medida.

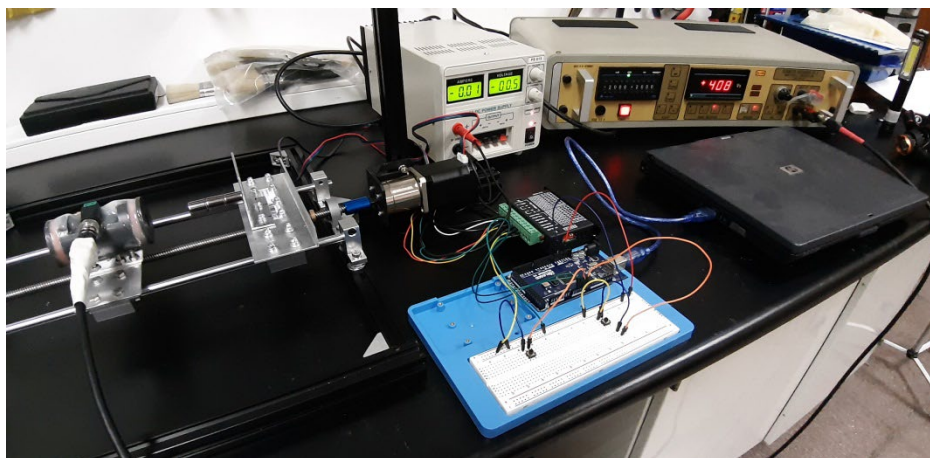


Figura 4. Instalación de medida mediante motor paso a paso.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

1. Reducir lo más posible el efecto del campo magnético terrestre en la medida del sensor. De los dos métodos para realizarlo se ha desarrollado la opción de la compensación mediante el uso de dos bobinas secundarias en oposición. Solo con este método, ya rebajamos la influencia del campo magnético terrestre más el efecto los campos magnéticos estáticos de nuestro laboratorio a un orden de 10^{-6} Wb muy por debajo de la mejor señal obtenida por el sensor que es de 10^{-4} Wb/ μ m.
2. Construcción de un sensor. Se ha diseñado y construido un sensor con dos bobinas en oposición para reducir al máximo posible el efecto del campo magnético terrestre. Se han construido cuatro modelos con distintas características.
3. Prueba del sensor en un buque. Esta es la parte que nos falta por realizar. Primero haremos una prueba de concepto, colocando el sensor sobre una probeta de chapa de acero naval y mediremos sus deformaciones en una máquina de tracción. Esto lo haremos en enero de 2020. Después de este experimento realizaremos una prueba real en un buque. Este experimento está sujeto a la disponibilidad de las instituciones o empresas donde podamos realizarlo, Salvamento Marítimo, Astilleros Armón, etc.

2.3 Tareas realizadas

1. Se ha diseñado un modelo de sensor con dos bobinas iguales coaxiales en oposición construidas sobre el mismo carrete para que por construcción produzca la compensación del campo magnético terrestre. Además, se aprovecha la segunda bobina para, utilizándola como un segundo sensor, duplicar la sensibilidad, ya que el efecto es como tener dos sensores en serie.
2. Se han construido cuatro sensores basados en el modelo anterior para comprobar no solo el grado de compensación del campo magnético terrestre sino también para entender la influencia de los parámetros geométricos en su sensibilidad.
3. Se han diseñado y construido dos sistemas de medida para comprobar los sensores:
 1. Un sistema que cambia la posición de los imanes con respecto a las bobinas mediante micrómetros modificados. Los imanes van montados sobre guías en cojinetes lineales que se mueven sobre un eje.
 2. Un sistema de aproximación micrométrico impulsado por un motor paso a paso. Los imanes van montados en un soporte que se mueve por un tornillo sin fin girado por el motor. Como ya se ha dicho el motor da 200 pasos por vuelta y está acoplado a un sistema reductor 100:1, de modo que el conjunto da 20000 pasos por vuelta. El motor se controla mediante un driver específico TB6600 y todo el sistema se controla mediante una placa Arduino Mega. Como el driver añade un microstep de hasta 32:1, lo que permite reducir aún más el avance por cada paso.
4. Se han realizado medidas del funcionamiento de los distintos sensores con varias configuraciones de imanes.

2.4 Resultados obtenidos

En cuanto a la compensación del campo magnético terrestre, hemos conseguido rebajarla hasta un orden de magnitud de 10^{-6} Wb. La operación se ha realizado bobinando las dos bobinas con una diferencia de 50 espiras, después se íbamos rebajando a mano esta diferencia y comprobando el efecto del campo moviendo el sensor ángulos de 90° . No hemos podido compensar el campo magnético terrestre por debajo del límite mencionado. Creemos que es muy difícil realizar esta compensación en nuestro laboratorio (posiblemente en ningún laboratorio) debido a que coexisten en ese espacio muchos campos magnéticos debidos a piezas, herramientas y estructuras de hierro que se encuentran imantadas y en muchos casos producen campos magnéticos del orden e incluso superiores al campo magnético terrestre.

Esperamos que en las condiciones de medida reales del sensor y una vez dotado también de una carcasa de apantallamiento magnético, el efecto del campo magnético terrestre se reduzca un orden de magnitud hasta 10^{-7} Wb. Así todo, como se verá más adelante, la sensibilidad del sensor obtenida es muy superior al efecto del campo terrestre.

La Tabla I muestra las características de los sensores fabricados. Todos ellos fueron mecanizados en nuestro laboratorio mediante un torno y una fresadora a partir de barras macizas de PVC.

Tabla I. Características de los sensores fabricados.

Sensor	N espiras por bobina (hilo de 0,05 mm)	Dimensiones carretes	Diámetro orificio eje (mm)
		Anchura/profundidad (mm)	
1	18150	6,2/12,5	13,0
2	20000	8,5/10,1	13,0
3	40000	10,0/20,0	20,0
4	18000	6,7/12,0	13,0

En cuanto a las medidas de la variación de flujo con la posición de los imanes, se realizaron medidas usando distintas geometrías de imanes de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ comerciales de grado N52 que presentan muy buenas propiedades magnéticas nominales: remanencia B_r de 1,4 T, campo coercitivo H_c de 10 kOe y producto máximo de energía $(BH)_{\text{max}}$ de 52 MGOe. Los imanes de mayor longitud se han construido juntando dos o más imanes iguales. Las medidas se realizaron haciendo un barrido de 0,5 en 0,5 mm con el fin de determinar la zona con mayor pendiente.

La Tabla II muestra el resultado de las medidas realizadas. Como se puede observar el mejor resultado se ha obtenido en el sensor 1 usando un imán de 12x45 (formado por tres imanes de 12x15 alineados).

Tabla II. Resultado de las medidas para obtener la mayor pendiente.

Sensor	Dimensiones Imán	Pendiente máxima ($\times 10^{-5}$ Wb/ μ m)
	Diámetro x longitud (mm)	
1	12x15	7,56
	12x30	9,24
	12x45	9,75
	10x45	4,22
	10x60	4,26
2	12x15	4,53
	12x30	5,76
3	19x19	4,49
	19x38	6,12
	12x30	2,12
	10x60	1,12
	8x60	0,74
4	12x30	5,98
	12x45	6,28
	12x60	6,20

Por otra parte, hay que destacar el mal resultado obtenido en con el sensor 3, que está formado por 40000 espiras, el doble que el resto y además utiliza los imanes más grandes y potentes. Este sorprendente resultado, junto con el resto de medidas realizadas nos indica que el factor más determinante en la sensibilidad de los sensores es la densidad de espiras por longitud.

Una vez que sabemos cuál es el mejor sensor de los que hemos construido, procedimos a simular un cambio de posición del imán dentro del orden de magnitud que debería medir cuando esté situado sobre una chapa de acero naval; como hemos mencionado anteriormente las deformaciones para un sensor de unos 10 cm de longitud que deberíamos ser capaces de medir cubren un rango desde las décimas de micra hasta unas 100 micras en las que la chapa de acero alcanzaría su límite elástico.

Para realizar estas medidas partimos de la posición con la máxima pendiente en el sensor 1 usando el imán de 12x45 mm. Esta vez montamos el sensor en sistema de aproximación micrométrico pilotado por el motor paso a paso. Se realizaron tres medidas: la primera de 100 en 100 μ m cubriendo una distancia de casi 30 mm, esta medida se puede observar en la figura 5. Una vez que sabemos dónde se encuentra aproximadamente el máximo de la pendiente (punto de máxima sensibilidad del sensor), realizamos en esa zona una nueva

medida variando la posición de 10 en 10 μm cubriendo una distancia de 1 mm; esta medida está representada en la figura 6. Para finalizar, en este mismo entorno de máxima sensibilidad realizamos una última medida variando la posición del imán de micra en micra obteniendo la gráfica representada en la figura 7.

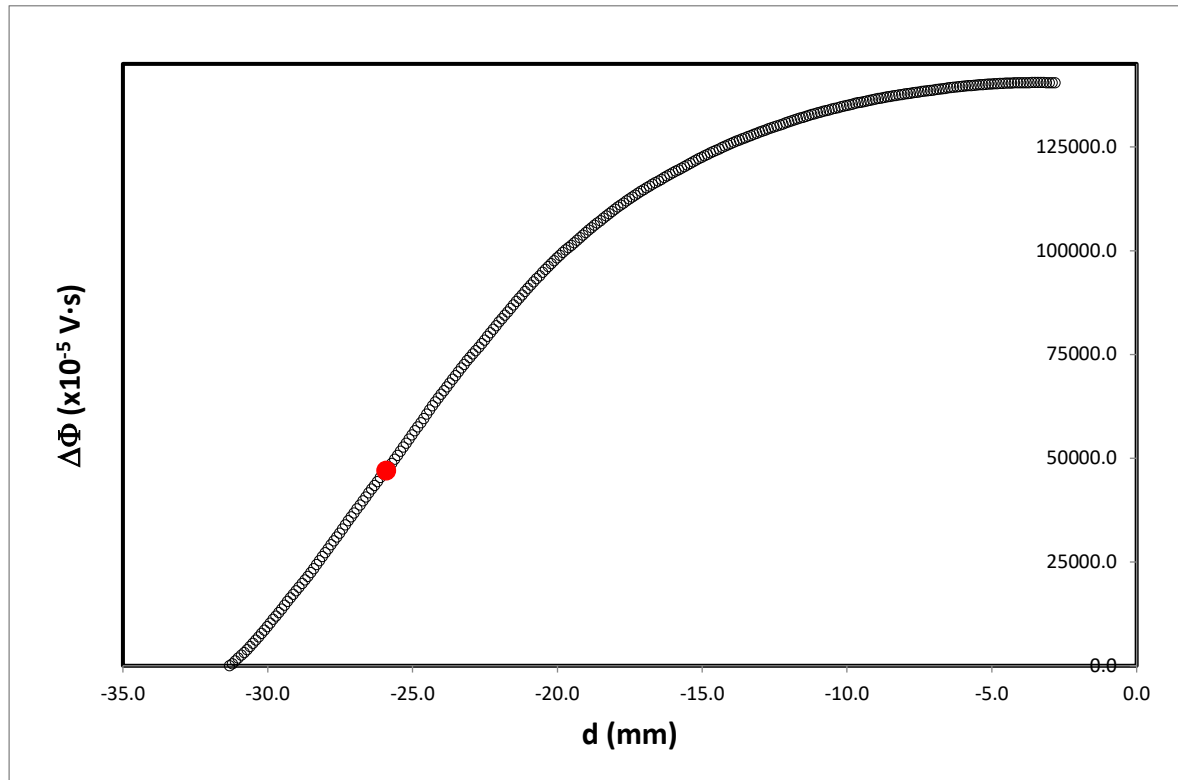


Figura 5. Medida de la variación de flujo obtenida en el sensor 1 usando un imán de 12x45 mm acercándolo de 100 en 100 μm al sensor. La distancia d es la posición del centro del imán con respecto al centro de la bobina. El punto rojo indica la posición de máxima pendiente. Este punto se encuentra a una distancia de 24,6 mm y el valor de la pendiente en esa zona es de $9,75 \times 10^{-5} \text{ Wb}/\mu\text{m}$

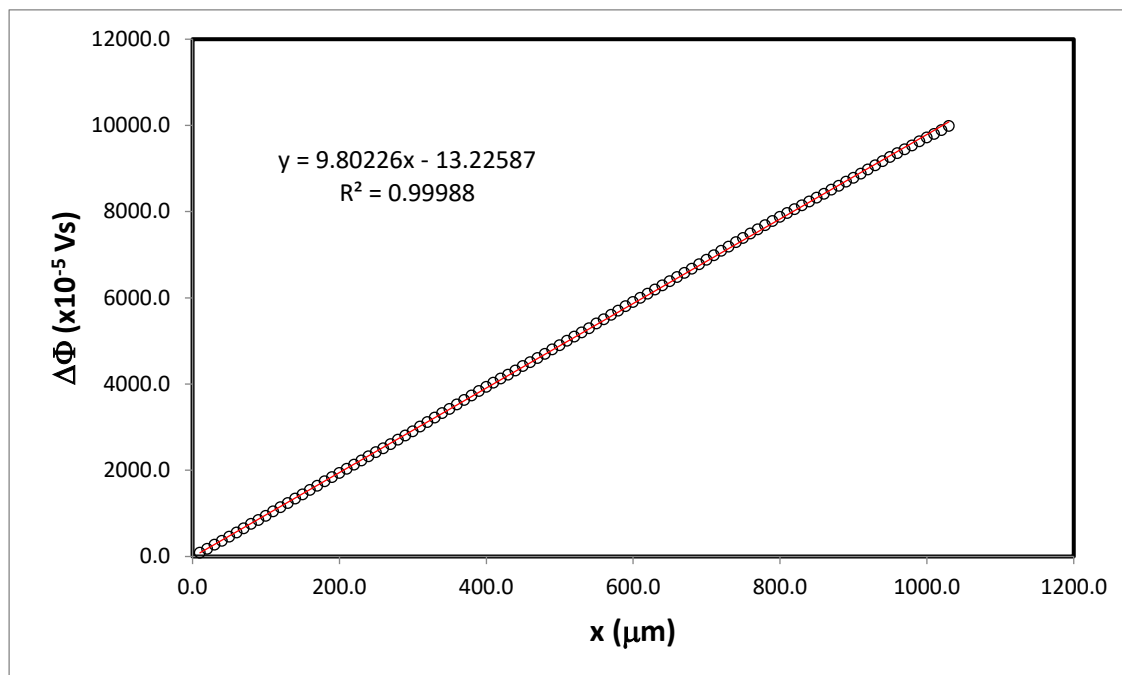


Figura 6. Medida de la variación de flujo obtenida en el sensor 1 usando un imán de 12x45 mm acercándolo de 10 en 10 μm al sensor. La distancia x en este caso es la distancia que se ha movido el imán hacia el sensor. La distancia total que se ha movido el imán es de 1 mm. Como se puede observar para esta distancia la variación obtenida del flujo es prácticamente lineal.

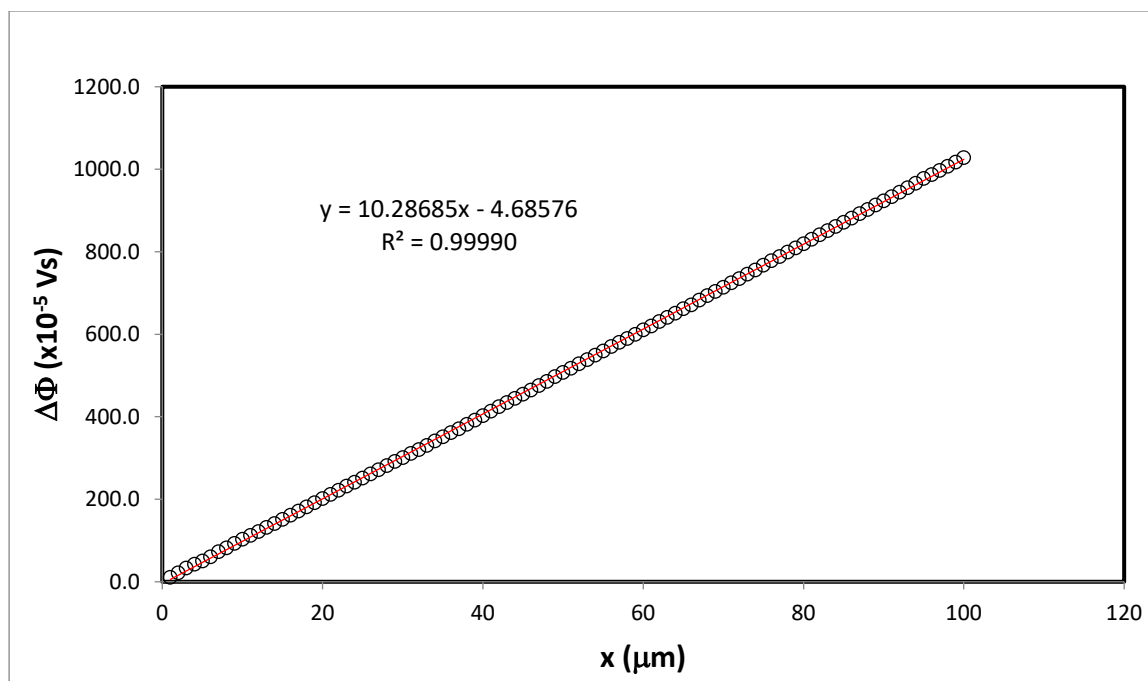


Figura 7. Medida de la variación de flujo obtenida en el sensor 1 usando un imán de 12x45 mm acercándolo de 10 en 10 μm al sensor. La distancia total que se ha acercado el imán es de 100 μm .

En primer lugar, hay que destacar la linealidad de las medidas obtenidas, que se puede apreciar en las gráficas expuestas en las figuras 6 y 7. Esto es importante de cara al sensor final ya que, como se ha dicho anteriormente, el mayor movimiento que se espera para el sensor final en funcionamiento puede ser del orden de $100\ \mu\text{m}$, por lo que tendríamos un sensor con comportamiento lineal, mucho más fácil de manejar.

En segundo lugar, de la regresión lineal aplicada a la gráfica de la figura 7 se obtiene una sensibilidad para el sensor del orden de $10^{-4}\ \text{Wb}/\mu\text{m}$. muy superior al ruido que generaría el campo magnético terrestre que como máximo tendría una amplitud de $10^{-6}\ \text{Wb}$.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

Los siguientes pasos que realizaremos para completar el presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

1. Tratar de aumentar más la sensibilidad del sensor construyendo bobinas con mayor densidad de espiras y combinando esto con el uso de los imanes más potentes de que disponemos.
2. Realizar una prueba de concepto del sensor aplicándolo sobre una pieza de chapa de acero naval estándar y reproduciendo las deformaciones mediante una máquina de tracción.
3. Diseñar una carcasa de chapa magnética para cubrir el sensor con el fin de reducir aún más la influencia de campos externos como el terrestre u otros campos estáticos que pudieran existir en la zona de aplicación del sensor.
4. Estudiar el mejor modo de eliminar el efecto de los cambios de temperatura sobre el sensor.
5. Realizar una prueba del sensor en un buque real.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)

Los resultados del presente proyecto se enviarán para su publicación a alguna revista internacional que encaje con la temática del mismo.

Dependiendo de los resultados se valoraría la publicación del trabajo en forma de patente.

3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-19-GIJÓN-1-16	3350			
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato				
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Alba Santamaría de los Ríos			
	Tareas	- Fabricación de los sensores - Diseño y montaje de las instalaciones de medida - Medidas experimentales sobre los distintos sensores			
	Período	5 Junio a 31 de Diciembre de 2019			

4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Título del proyecto/contrato	
Referencia	
Investigador/a/es principal/es	
Equipo investigador	
Periodo de vigencia	
Entidad financiadora	
Cantidad subvencionada	