

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2022

INFORME DEL PROYECTO REF. SV-22-GIJON-15

1. Datos del proyecto

Título: Diseño y desarrollo de un prototipo de magnetómetro inductivo para muestras ferromagnéticas masivas

Fechas inicial y final del proyecto: del 04/07/2022 al 30/12/2022

Investigador/a Principal: José Carlos Martínez García

Otros investigadores: María Arántzazu Argüelles Vélez

Personal contratado: David Cendán García

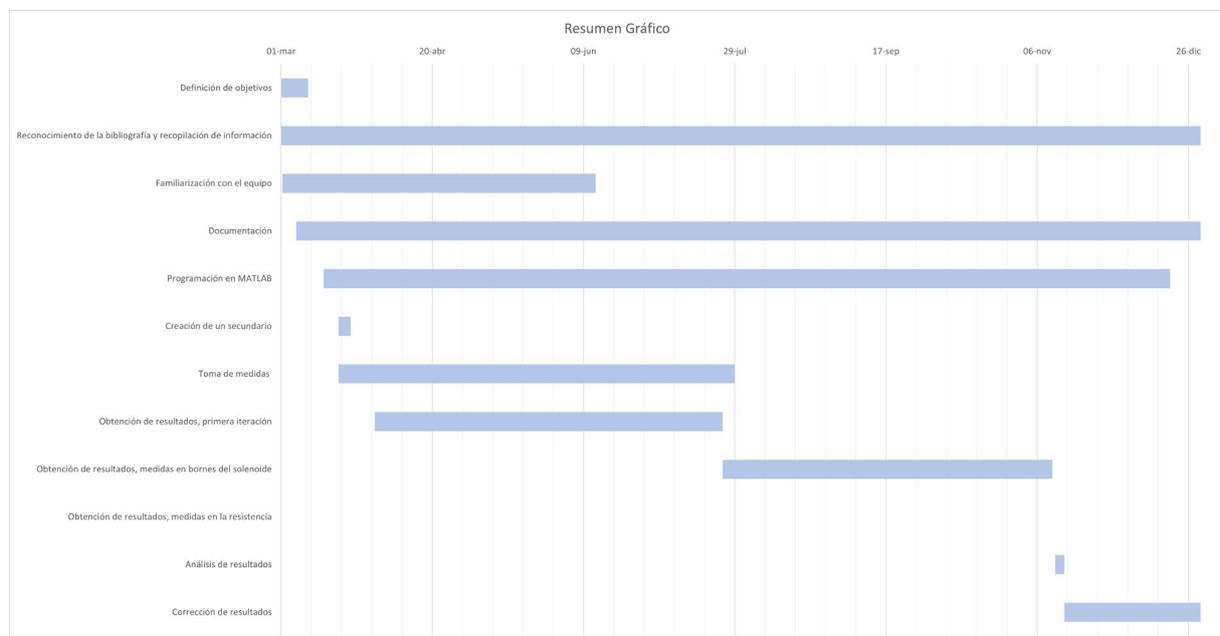
Fechas inicial y final de contratación: del 04/07/2022 al 30/12/2022

Empresas o instituciones colaboradoras: ArcelorMittal y FELEMAGM

Redes sociales de investigadores y empresas (Linkedin, Twitter, Instagram):

https://mobile.twitter.com/magnes_uniovi, Twitter: @MAGNES_UniOvi

2. Resumen Gráfico



3. Memoria descriptiva del proyecto

3.1 Resumen ejecutivo

La magnetometría es la medida de la magnetización M de un material en función del campo magnético H aplicado o, dicho de otro modo, la obtención de las curvas de magnetización $M(H)$ de un material determinado. Tradicionalmente este proceso se realiza en una instalación en la que se crea el campo magnético excitador H haciendo circular una corriente I por un circuito (que denominamos primario) y se detecta la fuerza electromotriz inducida en un circuito (secundario) como consecuencia del cambio temporal de la magnetización del material que se pretende medir (muestra). En muchas ocasiones el secundario se bobina en torno a la muestra y en otras simplemente en sus proximidades, pero en uno y otro caso, la muestra suele ser relativamente pequeña.

Como es bien sabido por conceptos de electromagnetismo básico, en una situación no estacionaria se producen inducciones mutuas entre el primario y el secundario, entre el primario y la muestra y entre la muestra y el secundario. Si la muestra es muy pequeña, la inducción mutua entre el primario y la muestra es despreciable, por lo que la información de magnetización de ésta última se recoge a través de su inducción mutua con el secundario. Sin embargo, si la muestra es muy masiva, su inducción mutua con el bobinado primario se hace muy patente, alterando su corriente y diferenciándola notablemente respecto de la "forma" de la tensión que lo alimenta.

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un prototipo de laboratorio que permita la magnetometría de materiales ferromagnéticos masivos a través de la inducción mutua "directa" entre la muestra y el circuito primario que genera el campo excitador, así como dotarlo del software necesario para su funcionamiento y tratamiento de las medidas obtenidas con él.

3.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Los objetivos de este proyecto consisten en: (1) el estudio de las medidas de magnetometría de muestras ferromagnéticas masivas en un magnetómetro inductivo tradicional que permita comparar los resultados obtenidos de las medidas del bobinado secundario con las medidas deducidas de la alteración de la corriente en el bobinado primario; (2) diseño de un magnetómetro de medida directa en el primario para muestras ferromagnéticas masivas; y (3) construcción y puesta en marcha de un prototipo de laboratorio basado en el diseño al que se refiere el objetivo anterior.

Se han completado los objetivos 1 y 2 y, por falta de tiempo, el objetivo 3, la construcción y puesta en marcha del prototipo de laboratorio, no ha podido concluirse.

3.3 Tareas realizadas

La metodología empleada ha sido un trabajo puro de desarrollo en laboratorio, abordando de modo consecutivo los objetivos planteados hasta finalizar el tiempo disponible. Las fases realizadas han sido las siguientes:

Fase 1: Realización y estudio de medidas de muestras masivas en un magnetómetro inductivo tradicional

Figura 1: Tareas de bobinado de circuitos secundarios durante las primeras fases del proyecto

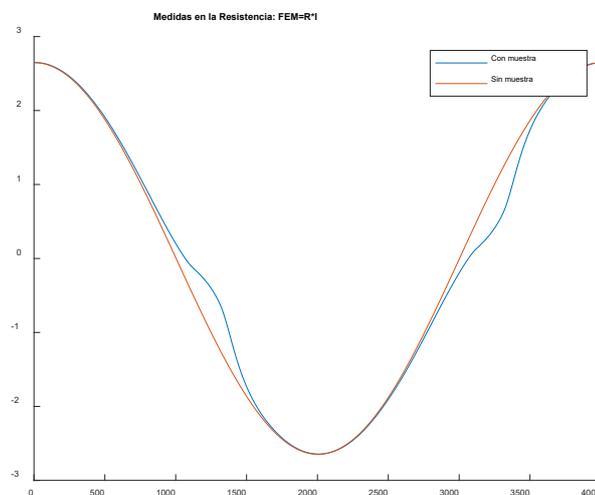


Como primer paso y para una familiarización del estudiante contratado con el equipo de medida, se midieron muestras masivas de acero facilitadas por la empresa colaboradora ArcelorMittal, sometidas a distintos tratamientos térmicos a diferentes temperaturas. Este paso requirió el bobinado de circuitos secundarios adaptados a la geometría de las muestras, mediante la máquina bobinadora que se muestra en la figura 1.

La magnetometría clásica mide el campo magnético H a partir de la tensión en bornes de una resistencia de medida R_m dispuesta en serie con el bobinado primario. Por su parte, la señal de la muestra se extrae de la fuerza electromotriz (fem) inducida en el bobinado secundario, en cuyo interior se ubica la muestra ferromagnética, introduciendo previamente el conjunto en el bobinado primario. La diferencia entre la fem con la muestra en el secundario y la fem en vacío (en adelante, señal tradicional) da lugar, por integración, a la señal de magnetización M .

Como el primer paso del proyecto era la obtención de la señal de magnetización M a partir sólo de señales provenientes del bobinado primario, se intentaron dos vías de medida: (i) la señal de tensión en bornes de la resistencia de medida, y (ii) la señal de tensión en bornes del propio bobinado primario. Una muestra de los resultados obtenidos puede apreciarse en las siguientes figuras:

Figura 2: Señales de tensión en bornes de la resistencia de medida, con muestra en el interior del bobinado primario (en azul) y sin muestra (en rojo)



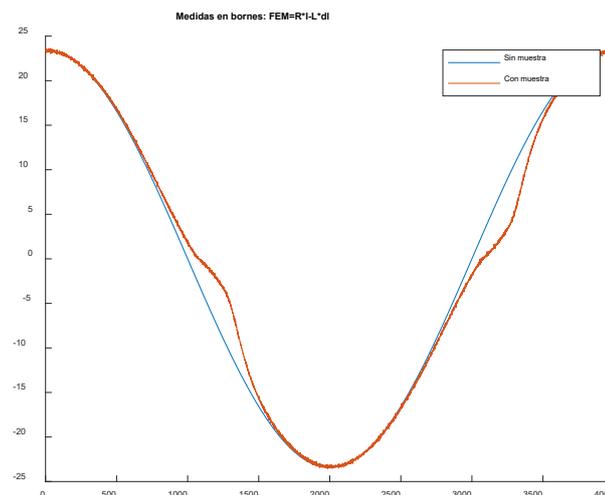
Como puede apreciarse en la figura 2, las dos señales ('con muestra' y 'sin muestra') son altamente coincidentes, proviniendo la diferencia de la distorsión de la señal (sinusoidal) que alimenta el circuito, debida los efectos inductivos que la presencia de la muestra produce sobre él. Puesto que la tensión en bornes de una resistencia pura es proporcional a la corriente $I(t)$ (siendo el factor de proporcionalidad la propia resistencia) la diferencia entre estas dos señales debe corresponderse con la fuerza electromotriz inducida por la muestra.

Un análisis similar puede hacerse de la figura 3: en ella se muestran las señales de tensión medidas en bornes del solenoide primario, cuando la muestra ferromagnética masiva se ubica en su interior y cuando está vacío. La señal 'sin muestra' se ve afectada tanto por la resistencia eléctrica del propio solenoide primario R_p como por su autoinducción L_p . Por lo tanto, dicha señal, es también proporcional a la corriente $I(t)$ que circula por él (siendo en este caso la constante de proporcionalidad el módulo de la impedancia $|Z_p|$), pero en este caso presenta un desfase φ_p respecto a ella, de valores

$$|Z_p| = \sqrt{R_p^2 + L_p^2 \omega^2}$$

$$\varphi_p = \tan^{-1}(L_p \omega / R_p)$$

Figura 3: Señales de tensión en bornes del solenoide primario, con muestra en su interior (en rojo) y sin muestra (en azul)



Fase 2: Diseño de un magnetómetro de medida directa en el primario para muestras ferromagnéticas masivas

A la vista de los resultados de la fase anterior, se plantearon dos caminos alternativos (o confluyentes) para la determinación de la señal de magnetización: utilizar las medidas de tensión en la resistencia pura, utilizar las medidas de tensión en bornes del bobinado primario, o utilizar ambas señales. La dificultad estriba en que no se pueden realizar medidas 'con muestra' y 'sin muestra', sino que la determinación de la medida 'sin muestra' o, más concretamente, la diferencia entre la señal 'con muestra' y la señal 'sin muestra' debe hacerse a partir exclusivamente de la señal 'con muestra', que es la única que, por una cuestión de economía y fiabilidad, debería realizarse en el magnetómetro a diseñar.

Por ello resultaba necesario establecer el proceso matemático de obtención de esta señal, que es el verdadero núcleo de este proyecto. La clave del proceso es que la alimentación del circuito primario, a partir de un generador de funciones, es una tensión sinusoidal pura. Como puede apreciarse, tanto en la figura 2 como en la figura 3, las diferencias entre las señales 'con muestra' y las señales 'sin muestra' consisten esencialmente en el alejamiento del comportamiento puramente sinusoidal de éstas últimas.

Por ello, el procedimiento recomendable para el objetivo establecido es eliminar en la señal 'con muestra' la componente sinusoidal en fase con la corriente que iguale a la señal 'sin muestra'.

Cuando se habla de componentes sinusoidales y no sinusoidales, el lenguaje a utilizar es, sin duda, el análisis de Fourier: cualquier función del tiempo $f(t)$ periódica, continua y con derivadas continuas puede descomponerse, mediante transformación de Fourier, en componentes sinusoidales de distintas frecuencias. En particular, la transformada discreta de Fourier nos permite escribir para cualquier función definida por un número m finito de valores j , con $j = 1, 2, \dots, m$

$$f_j = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{(m-1)/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{m} j\right) + \sum_{n=1}^{(m-1)/2} b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{m} j\right)$$

donde el término asociado al coeficiente a_0 es el 'offset' de la función, el término asociado al coeficiente a_1 es la componente fundamental de tipo coseno, es decir, simétrico en el intervalo de definición, el término asociado al coeficiente b_1 es la componente fundamental de tipo seno, es decir, antisimétrico en el intervalo, y los restantes términos son los distintos armónicos de uno y otro tipo, con frecuencias múltiplos de la fundamental.

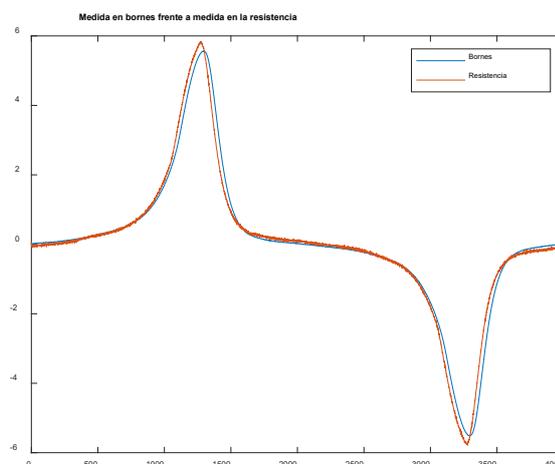
Puesto que el primario se va a alimentar con una tensión sinusoidal pura, el análisis de Fourier de la señal de corriente nos permitirá deducir la alteración producida por la magnetización por comparación con la señal de corriente en ausencia de material. De este modo se deducirá numéricamente la propia magnetización del material.

•

3.4 Resultados obtenidos

El procedimiento seguido en este proyecto fue determinar, a través de los correspondientes coeficientes de Fourier, la componente fundamental de las señales de tensión medidas, tanto en bornes de la resistencia de medida como en bornes del solenoide primario y restársela a la señal completa. Los resultados se ilustran en la figura 4

Figura 4: Diferencia entre la señal 'con muestra' y la señal 'sin muestra' en la resistencia de medida (color rojo) y en bornes del solenoide primario (color azul)



Aunque se aprecia una ligera diferencia entre ambos resultados, tras la integración para obtener las curvas de magnetización, esta diferencia es prácticamente inapreciable. En todo caso, el origen de esta diferencia, a falta de una mayor profundidad en el estudio del procedimiento matemático, parece estar

en el mayor ruido de la medida experimental de la señal de tensión en bornes del solenoide primario, como puede apreciarse en la figura 3, en comparación con la medida en bornes de la resistencia de medida, que se muestra en la figura 2. Por este motivo, y para el diseño del magnetómetro se ha determinado utilizar las medidas en la resistencia de medida.

3.5 Trabajos o necesidades futuras

Los resultados son más que prometedores y se considera que los objetivos más importantes y básicos para el diseño del magnetómetro de muestras masivas están cumplidos. No obstante, aún queda mucho trabajo por hacer. El magnetómetro 'tradicional' disponible en el Laboratorio de Investigación número 2 del Departamento de Física, ya ha sido adaptado para la realización de estas medidas, pero se está estudiando la posibilidad de la puesta en marcha de un segundo magnetómetro para la medida exclusiva de muestras masivas, dejando el antiguo para medidas de muestras pequeñas. Esta es la fase 3 del proyecto que, por la tardanza en la firma de los contratos y la insuficiente disponibilidad de tiempo del estudiante contratado (para compatibilizar el desarrollo del trabajo con sus estudios), no ha podido ser abordada en el tiempo disponible

3.6 Divulgación de los resultados

Aunque se espera publicar los resultados de este proyecto en revistas internacionales especializadas en instrumentación científica, hay dos cuestiones que de momento paralizan esta divulgación: por un lado, el trabajo está aún inacabado; por otro, la colaboración con la empresa ArcelorMittal conllevó la firma de un contrato de confidencialidad, por lo que la publicación de resultados debe ser consensuada con la empresa.

4. Memoria económica

4.1 Gastos:

Incluir los gastos asociados al proyecto: personal del contratado IUTA u otras personas colaboradoras, materiales utilizados, amortización de equipos durante el proyecto,...

Concepto	Gasto
Personal	2.404€
Fungibles	
Amortización	
...	
TOTAL GASTOS	2.404€

4.2 Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
--	----------	---------

Ayuda IUTA		2.404€
TOTAL INGRESOS		2.404€

5. Bibliografía

1. M. Rivas, P. Gorria, C. Muñoz-Gómez and J. C. Martínez-García, "Quasi-Static AC FORC Measurements for Soft Magnetic Materials and Their Differential Interpretation," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, pp. 1-6, Nov. 2017, Art no. 2003606, doi: 10.1109/TMAG.2017.2696165
2. Felix Groß, José Carlos Martínez-García, Sven Erik Ilse, Gisela Schütz, Eberhard Goering, Montserrat Rivas, and Joachim Gräfe, "gFORC: A graphics processing unit accelerated first-order reversal-curve calculator", Journal of Applied Physics 126, 163901 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5120495>